Oskarshamnsverket I

En pionjärinsats i svensk kärnkraftutbyggnad

Av Olle Gimstedt

Den svenska elförsörjningen är nu till ungefär lika delar baserad på vattenkraft och kärnkraft, vilka tillsammans svarar för cirka 95 % av den totala elproduktionen i landet. Av kärnkraften kommer 80 % från anläggningar med kokarreaktorer (BWR) av svensk konstruktion. Den första reaktorn av denna typ var den som installerades i det första blocket, Oskar I, (O I), i Oskarshamnsverket. Det beställdes år 1965 av kraftföretaget OKG. Reaktortillverkare, tillika huvudleverantör av hela anläggningen, var ASEA (sedermera ASEA-ATOM) med STAL-LAVAL som tillverkare av turbindelen. O I togs i kommersiell drift i februari 1972, och har sålunda nu, 1990, drygt 18 års total drifttid bakom sig. Anläggningen har under denna tid producerat över 50 TWh el. Under de senaste femton åren av reguljär drift har dess tillgänglighet för elproduktion varit över 80 %. Utöver att vara den första i en serie svenska kärnkraftanläggningar förtjänar den därför väl sitt betyg som en pålitlig "arbetshäst" i det svenska kraftsystemet. I anslutning till följande beskrivning av Oskar I kommer även de krav och överväganden som på sin tid låg till grund för dess utformning att redovisas, liksom även i vilken utsträckning dessa uppfyllts och visat sig vara korrekta, detta mot bakgrund av erfarenheterna från driften.

Historisk bakgrund

I Sverige hade före 1945 inte bedrivits någon forskning med anknytning till den år 1939 upptäckta fissionsprocessen. Detta kan i och för sig synas märkligt eftersom en av de fysiker, nämligen Lise Meitner, som medverkat i att påvisa denna process varit verksam inom landet från fyrtiotalets början fram till år 1945. Efter Japan-bomberna i augusti 1945 skedde emellertid en mycket snabb mobilisering av tillgängliga resurser i form av framstående forskare och tekniker. Ordet mobilisering är i sammanhanget nog så relevant, eftersom det ju var de militära aspekterna som i första hand påkallade uppmärksamhet. Den verkningsfulla atombomben syntes erbjuda möjligheter för ett litet land att möta hot från en aggressiv granne. I färskt minne fanns då den nesa man fått utstå genom de eftergifter som vi under kriget tvingats till av Hitlers Tyskland.



1. Oskarshamnsverket I, beställt 1965, färdigbyggt 1970. Reaktorns första kriticitet (självunderhållande kedjereaktion) äger rum den 12 december 1970. Foto ur OKG bildarkiv.

De första åtgärderna skedde i regi av nyligen inrättade försvarets Forskningsanstalt (FOA). För planläggning av forskning inom området tillsattes Atomkommittén i november 1945. Enligt de direktiv för denna som utfärdades av dåvarande ecklesiastikministern Tage Erlander gällde det emellertid att "främst finna lämpliga metoder för tillgodogörande av atomkraften för fredliga ändamål". Kommittén satte som mål att alstra atomenergi ur svenska råvaror för att uppnå självförsörjning, detta genom framställning av uran ur mellansvensk skiffer och genom att bygga "atomenergistaplar". För genomförande av programmet bildades 1947 det halvstatliga AB Atomenergi (AE).

Sveriges första reaktor, forskningsreaktorn R 1, byggdes 1951–54 under ledning av Sigvard Eklund. Denne, som tidigare bl a verkat som forskare vid Nobelinstitutet och 1945–50 varit chef för FOA's kärntekniska avdelning, var nu forskningschef i AE. R 1-reaktorn, som använde från Frankrike inlånat uran och tungt vatten från Rjukan i Norge, färdigställdes i juli 1954, och därmed hade Sverige definitivt inträtt i atomåldern. (Det franska uranet kunde återlämnas sedan man fått fram eget från AE's extraktionsverk i Kvarntorp, vilket stod färdigt 1953). Den fortsatta utbyggnaden av AE's forskningslaboratorie- och utvecklingsresurser skedde fr o m 1955 i Studsvik. Härmed hade linjerna dragits upp för vad som kom att kallas "den svenska linjen", dvs natururan-reaktorer modererade med tungt vatten. För en mera utförlig beskrivning av denna epok i svensk kärnenergihistoria hänvisas till uppsatser av Sigvard Eklund[1] och Karl-Erik Larsson[2].

Arbetet med utveckling av svenska tungvattenreaktorer, skildrat av Harry Brynielsson i *DÆDALUS*[3], fortsatte under de följande åren fram till 1970. Dess främsta resultat var idrifttagningen av Ågesta kraftvärmeverk år 1964.

Det svenska atomenergiprogrammet hade baserats på tre förutsättningar, vilka återspeglade förhållandena under atomålderns första decennium, nämligen

a) bränsleförsörjningen måste baseras på naturligt uran, eftersom uran, naturlig eller anrikat, ej stod till förfogande genom import.
b) teknisk-vetenskaplig information beträffande fissionsprocessen, reaktorkonstruktion, urananrikning samt tillverkning och hantering av bränsle var svåråtkomlig eftersom den var hemligstämplad av de fyra atomvapenmakterna. I USA reglerades detta genom MacMahon-lagen.
c) Sverige förbehöll sig handlingsfrihet beträffande egna atomvapen.

Genom president Eisenhower's framgångsrika agerande såväl på hemmaplan genom ändring av MacMahon-lagen som i december 1953 inom FN skapades förutsättningar för atomenergins fredliga utnyttjande i internationell skala, kopplat till ett kontrollsystem för förhindrande av spridning av atomvapen. Milstolpar i denna utveckling var den första Genève-konferensen 1955 i FN's regi och tillkomsten av det internationella atomenergiorganet IAEA år 1957. Nu frisläpptes mängder av hittills hemlighållna data av USA, England, Sovjetunionen och Frankrike. Detta, tillsammans med löften om försäljning av anrikat uran, skapade ett decennium som Bertrand Goldschmidt, framstående kärnfysiker och sedermera ansvarig för de internationella relationerna hos franska Commissariat à l'Energie Atomique, kallade *l'europhorie atomique*[4].

Nu öppnades för Sveriges del helt nya möjligheter. Man var inte längre bunden av de begränsningar som de ovan angivna ursprungliga förutsättningarna innebar. Tillgång till anrikat uranbränsle gjorde det

möjligt att utforma enklare reaktorkonstruktioner, man kunde som moderator använda vanligt vatten (som nu kallades "lättvatten" för att särskiljas från tungvatten). Bränslebyten behövde inte ske under drift meddelst komplicerade omladdningssystem, såsom var fallet vid kraftreaktorer som drevs med naturligt uran, utan detta kunde göras en gång om året i samband med avställning för revision och översyn.

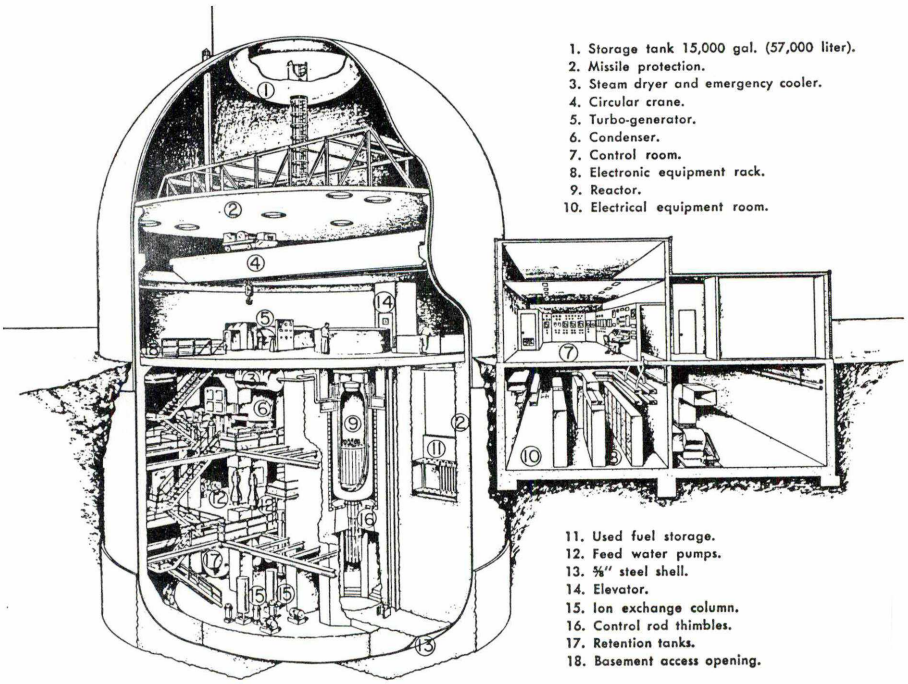
Den tredje av de tidigare huvudförutsättningarna för det svenska programmet, nämligen att bevara möjligheten för anskaffande av egna atomvapen, började även att ifrågasättas. I stället för att vara en tillgång för det svenska försvaret kunde atomvapen vara en belastning, i och med att de avsevärt ökade risken för ett preventivangrepp. Därjämte, och detta utgjorde måhända det främsta skälet för att avstå från dessa vapen, så låg det i Sveriges intresse att man via FN etablerade ett kollektivt säkerhetssystem mot spridning av atomvapen (vad som blev Non Proliferation Treaty, NPT) med IAEA som verkställande organ. Det skulle emellertid komma att dröja ända till 1968 innan riksdagen beslutade att Sverige inte skulle gå vidare på atomvapenlinjen. Detta ledde till svenskt undertecknande av NPT år 1970.

Kraftindustrins val av reaktortyp

Före 1954 hade de icke-statliga svenska kraftföretagen visat atomenergin en ganska förströdd uppmärksamhet. Man såg visserligen framför sig ett alltmer ökande behov av elproduktionsresurser, men man ansåg att detta i första hand borde täckas genom fortsatt utbyggnad av vattenkraft. Vissa svårigheter härför förelåg emellertid på grund av invändningar från naturvårdshåll mot exploatering av outbyggda älvar. De låga bränslepriserna gjorde också oljeeldade kondenskraftverk intressanta med hänsyn till dessas betydligt lägre anläggningskostnader, men olja som bränsle innebar samtidigt ett större utlandsberoende. Man var därför inte främmande för att atomkraften kunde komma in som en ny produktionskälla, men bedömde detta ligga kanske 15–20 år framåt i tiden, och nöjde sig med att följa utvecklingen genom att ingå som delägare i AB Atomenergi och avdela viss personal dit som auskultanter. (För Vattenfall var situationen delvis annorlunda eftersom statsmakterna förutsatte dess medverkan när det gällde atomkraftproduktion i prototypanläggningar konstruerade av AE).

Under år 1954 kom kraftföretagen mot bakgrund av den internationella utvecklingen att ägna atomkraften ett ökande intresse, vilket efter Genèvekonferensen 1955 resulterade i att särskilda atomkraftavdelningar skapades för uppföljning av tekniken och projekteringsarbete. Hos de större enskilda och kommunala kraftföretagen skedde detta genom att man bildade Atomkraftkonsortiet AKK med dess driftbolag AB Atomkraftverk. Detta skeende är beskrivet av förf dels i Svenska Kraftföreningens publikationer[5], dels i en historik om kraftföretaget OKG[6].

Vid inventering av reaktortyper lämpliga i samband med kraftproduktion startade man vid årsskiftet 1955/56 inom AKK från scratch. Detta innebar att man utöver den svenska tungvattenlinjen även beaktade möjligheten av att använda i utlandet utvecklade reaktorer. Därför studerades programmen i USA och England. I USA arbetades det ursprungligen utefter många linjer samtidigt, såsom lättvattenreaktorer av både tryckvatten- (PWR) och kokartyp (BWR), natrium- resp gaskylda grafitmodererade reaktorer, organiskt modererade och kylda reaktorer, homogena reaktorer (uran i lösning i tungvatten), natrium-kaliumkylda snabba reaktorer m fl, vilka redovisats vid Genève-konferensen i en mångfald rapporter. England hade valt gasgrafitreaktorer av Magnox-typ som första generation av kraftreaktorer. Aktiv marknadsföring bedrevs av amerikanska och engelska systemleverantörer, som regel i samarbete med svenska tillverkande



2. EBWR – Experimental Boiling Water Reactor – var den första kraftgenererande direktcykel kokarreaktorn. Den var nummer sex i en serie experimentanläggningar som byggdes av den amerikanska Atomenergikommissionen (AEC) vid Argonne National Laboratory i Illinois. Termiska effekten var 100 MW, ångan användes bl a för att driva en 5 MW turbin. Den togs i drift i början av 1957. All information om EBWR var öppet tillgänglig genom "Atoms for Peace"-programmet, bl a via kurser för utländska tekniker. Hit sökte sig också ett flertal svenska tekniker från såväl tillverkare som kraftföretag. UN Publication, No 1956, IX 1 Vol 3.

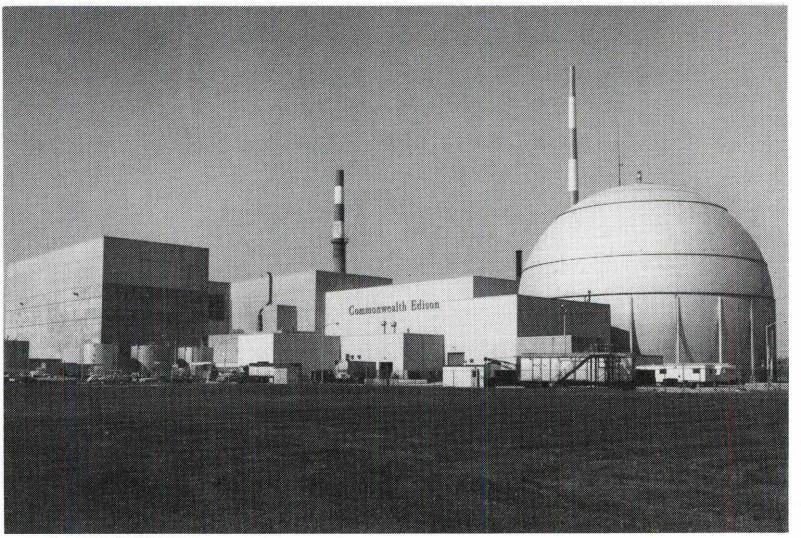
företag, och AKK erhöll preliminära offerter på anläggningar med effekter inom området 50–200 MW.

Intresset kom ganska snart att koncentreras på de amerikanska lättvattenreaktorerna PWR och BWR. Härvid vägde givetvis tungt det förhållandet att det svenska utvecklingsarbetet praktiskt taget helt låg inom området för vattenreaktorer, och att man därmed inom landet för sådana hade tillgång till expertis, laboratorier och provningsinstallationer. Detta var en nödvändig förutsättning för att man med framgång skulle kunna ge sig in i ett kraftreaktorprojekt. Man uppställde dessutom kravet att den första reaktorn skulle vara av en typ som utprovats i reguljär kraftverksdrift, vilket ej var fallet med tungvattenreaktorn. Detta ledde till att det omkring 1958 stod klart för AKK och dess delägare att det enda realistiska alternativet till den svenska reaktorlinjen representerades av de amerikanska lättvattenreaktorerna. Om man valde denna lösning kunde anskaffningen ske antingen genom direktimport, eller, vilket för en svensk beställare vore att föredraga, genom ett "joint venture" mellan svensk och amerikansk leverantör.

Vid slutet av 1958 fanns av tryckvattenreaktorer, PWR – förutom de hemligstämplade u-båtsmaskinerna samt en mindre kraftproducerande anläggning av "package"-typ för US Army – endast Shippingport om 60 MW eleffekt i drift. Huvudleverantör var Westinghouse, och driften ombesörjdes av kraftbolaget Duquesne Light Co. I framskridet byggnadsstadium befann sig även två större kraftstationer om cirka 150 MW, vilka skulle komma att tas i drift 1961–62.

När det gällde kokarreaktorer, BWR, var basen ännu smalare. Förutom en serie experimentreaktorer fanns vid Argonne National Laboratory i drift prototypreaktorn EBWR om 20–100 MW termisk effekt, försedd med en turbingenerator om 5 MW eleffekt. Dessutom hade General Electric (GE) i Vallecitos tagit i drift sin egen experimentanläggning, VBWR, om 50 MW termisk effekt som gav ånga till kraftbolaget Pacific Gas & Electric's (PG&E) turbin om 5 MW. I det närmaste färdigställd var den hos GE av kraftbolaget Commonwealth Edison Co på "turnkey"-basis beställda anläggningen i Dresden, Illinois. Den hade en eleffekt av 200 MW och sattes i drift 1960. Under byggnad befann sig även två 50 MW-anläggningar, av vilka en som byggdes för PG&E i Humboldt Bay i norra Californien skulle komma att i flera avseenden bli en prototyp för kommande generation av GE's BWR-reaktorer. Den skulle emellertid komma i drift först 1963.

AKK hade under dessa första år hunnit med en omfattande inventering över tänkbara förläggningsplatser. Denna ledde så småningom till valet av Simpevarp vid ostkusten 20 km norr om Oskarshamn. En koncessionsansökan för "Simpevarps atomkraftverk" ingavs av AKK i maj 1959, baserad på en preliminär offert från General Electric. Den



3. Dresden Nuclear Power Station, ca 80 km sydväst om Chicago, byggdes av General Electric för kraftföretaget Commonwealth Edison. Stationen hade en kokarreaktor av dualcycle-typ som gav en netto eleffekt av 200 MW. Den togs i drift 1960, och var den första BWR-anläggningen för kommersiell kraftproduktion. Foto ur USCEA bildarkiv.

åtföljande beskrivningen visade en kraftstation av samma typ som den ovannämnda Humboldt Bay. Den elektriska effekten angavs till 50–60 MW.

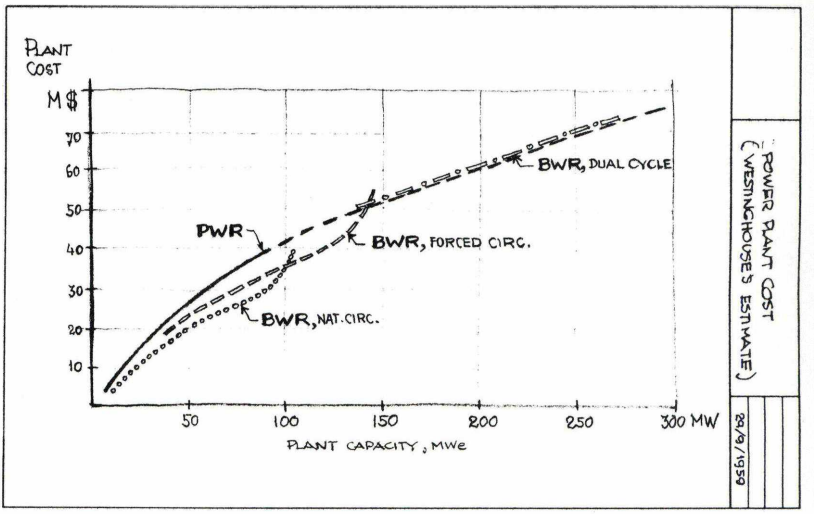
Att man kommit fram till en BWR-reaktor hade sin grund i följande överväganden:

– Den största fördelen med BWR är att reaktorångan användes direkt i turbinen. Man behöver därför inga ånggeneratorer, och vid samma admissionstryck till turbinen blir arbetstrycket i reaktorn endast hälften så stort som vid PWR.

– Vatten i två-fas medger kylning medelst naturlig cirkulation (inga cirkulationspumpar erforderliga) vid effekter åtminstone upp till 100 MW el.[7]

Dessa förhållanden skulle leda till lägre anläggningskostnader, vilket också PWR-leverantören Westinghouse var medveten om, se exempelvis diagrammet, fig 4, även om man för effekter över 150 MW ansåg sig helt konkurrensmässig.

En annan sak som vid jämförelsen mellan BWR och PWR talade till fördel för den förra var den lägre initialanrikningen hos bränslet och därmed lägre slutanrikning efter bestrålning. Därmed borde inte upparbetning av det utbrända bränslet vara erforderlig ur ekonomisk synpunkt. Man slapp sålunda osäkerheten med denna process, som förutsatte en marknad för det utvunna plutoniet.



4. Kostnadsjämförelse mellaN PWR och BWR enligt en intern Westinghouserapport 1959.

Att man valde 50–60 MW effekt motiverades av att detta syntes vara en praktiskt minsta storlek för att ge väsentliga erfarenheter för den fortsatta atomkraftsatsningen ifråga om upphandling, byggande och drift av kommersiella verk.

Vägen till en svensk reaktorleverantör

Anbudsförfrågan utsändes av AKK och offerter erhölls i mitten av 1960 från två leverantörsgrupper, dels ASEA/NOHAB med General Electric som underleverantör för reaktordelen, dels Allis-Chalmers/Kockums. (Allis-Chalmers var då engagerade i Sverige som leverantörer för AE's materialprovningsreaktor R2 i Studsvik, vilken använde anrikat uran och vanligt vatten). Inget av anbuden uppfyllde AKK's önskemål om pris och garantier, men med den sistnämnda leverantörsgruppen som konsult inleddes av AKK fortsatt detaljprojektering vilken pågick ett par år.

Under tiden hade ASEA tagit sitt engagemang inom atomområdet under omprövning, vilket hittills till övervägande del varit inriktat på den svenska tungvattenlinjen, och funnit att en egen satsning på BWR var motiverad. Detta ledde till att ASEA år 1963 till AKK/AKV offererade en 60 MW-anläggning av egen konstruktion. Anbudet befanns så fördelaktigt att AKK-styrelsen beslöt rekommendera delägarföretagen att godkänna en beställning. Den totala kostnaden för projektet beräknades till cirka 130 Mkr. Detta innebar en inte direkt räntabel investering av 70 Mkr, om värdet av kraften bestämdes av kostnaden för oljekondenskraft vid rådande pris på olja, ca 70 kr/m^3. Om ingen ökning av oljepriset inträffade skulle detta bli AKK's kostnad för inträdesbiljetten till den kommersiella atomkraftutbygg-

nad som man bedömde bli aktuell att sätta igång någon gång i mitten av 1970-talet. Tillräcklig anslutning erhölls emellertid ej från delägarna, endast ca 60 % av andelstalen uppnåddes.

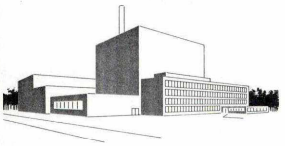
Vid årsskiftet 1963/64 skedde emellertid en total omsvängning i synen på atomkraftens ekonomi. Det amerikanska kraftbolaget Jersey Central, ingående i koncernen General Public Utilities, beställde i december 1963 hos General Electric ett 520 MW atomkraftverk av BWR-typ, Oyster Creek. Totalkostnaden, 68 millioner $, för turnkey-leveransen var sensationellt låg och innebar med kol- eller oljekraft konkurrenskraftig atomkraft. Detta gav anledning till att bedöma som sannolikt att stora lättvatten-reaktorer skulle vara ekonomiskt motiverade i AKK-gruppens system redan 1970, alltså betydligt tidigare än man förut räknat med.

I mars 1964 begärde AKK från ASEA anbud avseende turnkey-leverans av det första blocket om minst 300 MW nettoeffekt i ett kärnkraftverk om två enheter. Reaktorn skulle vara av BWR-typ. Man angav att förutsättningen för att anbudet skulle bli föremål för fortsatt behandling var att det bekräftade antagandet om med konventionell kondenskraft ekonomiskt likvärdig kärnkraft. (Från och med nu gick man över till benämningen "kärn" i stället för det vetenskapligt inkorrekta "atom", vilken kommer att ske även i denna uppsats). Detta villkor innebar att även om man exklusivt förhandlade med ASEA skulle konkurrensmomentet bibehållas, i detta fall med en fossileldad anläggning. Det nya projektet kallades Oskarshamnsverket. Genom ett nytt konsortialavtal ombildades AKV till Oskarshamnsverkets Kraftgrupp AB – sedermera OKG AB.

När det gällde 60 MW-projektet hade man, som ovan beskrivits, från beställarens sida godtagit en av ASEA självständigt utvecklad reaktor. När det nu gällde en minst fem gånger större anläggning låg det närmast till hand att ASEA skaffade sig ett licensavtal med General Electric. Detta företag hade nu tillgång till fem års drifterfarenheter från Dresden-stationen om 200 MW, ett par års dito av 50 MW-verken Humboldt Bay och Big Rock Point, och man hade just startat upp den italienska 150 MW Garigliano-stationen av Dresden-typ. Nu pågick utvecklings- och konstruktionsarbetet för 500 MW-anläggningarna Oyster Creek och en nybeställd replik härav vid Nine Mile Point för kraftbolaget Niagara Mohawk Co. Dessa borde utgöra goda förebilder för Oskarshamnsverket. De diskussioner som ASEA förde med GE hade varit besvärliga och dragit ut på tiden, och utsikterna för det svenska företaget att uppnå ett tillfredsställande licensavtal verkade avlägsna. ASEA's ledning, som av sina kärnkrafttekniker blivit övertygade om att man hade erforderlig kompetens för att tekniskt ro i land det stora projektet utan stöd av amerikansk licens, tog då beslutet att man skulle gå fram med egen konstruktion. Detta skulle givetvis komma att innebära investeringar bl a i egna prov-

ningsanläggningar, samarbetsavtal med AB Atomenergi beträffande utveckling och provning av bränsle samt ett betydande ekonomiskt risktagande. Man begärde besked av OKG huruvida ASEA skulle godkännas som huvudleverantörer av en anläggning med en reaktor av egen konstruktion. OKG gav ett positivt svar, vilket ledde till ett preliminärt anbud å en 400 MW-anläggning i slutet av 1964. Detta var tillräckligt attraktivt för beställaren för att man skulle gå vidare.

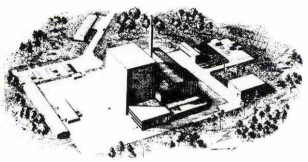
Beställningen av O I



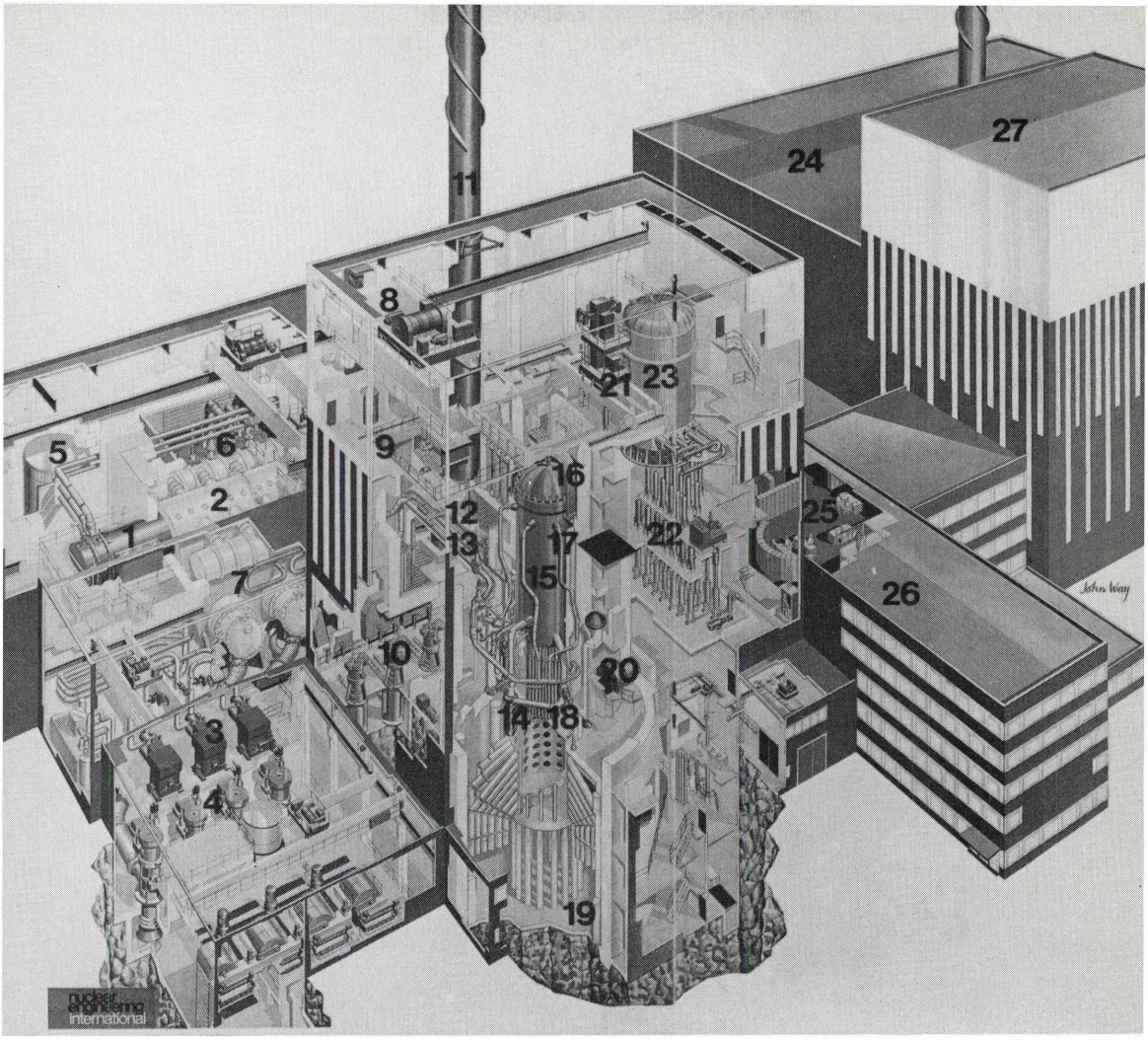
ASEA lämnade i april 1965 ett definitivt bindande anbud, vilket efter fortsatt granskning och förhandlingar resulterade i beställningsbrev från OKG den 14 juli samma år. Koncessionsansökan inlämnades av OKG en vecka senare. Beställningsbrevet fullföljdes genom ett slutligt kontrakt, som undertecknades i mars 1966 efter det att Atomdelegationen tillstyrkt OKG's koncessionsansökan. Koncession beviljades av regeringen i april, och den 7 juni skedde startskottet i Simpevarp.

Härmed hade ett av de största projekten i den svenska industriutvecklingens historia igångsatts. Det gällde att bygga vad som skulle bli Sveriges största kraftverksenhet med användning av en teknik som ännu var under utveckling. Företaget var djärvt, såväl för leverantören som beställaren, vilka bägge tog stora, ehuru kalkylerade, risker. Visserligen hade man facit till problemet: amerikanerna hade visat att kraftproduktion i kommersiell skala kunde ske med BWR-reaktorer, men någon full information om de bakomliggande konstruktionsförutsättningarna kunde man utan licensavtal inte få från General Electric eller deras beställare. Leverantören ASEA kunde stödja sig på vad som offentligt framkommit genom det amerikanska federala kärnenergiprogrammet samt på de erfarenheter man skaffat sig på hemmaplan genom sin medverkan i det svenska utvecklingsarbetet på tungvattenområdet, och genom både sitt eget och beställarens tidigare projektarbete med det mindre BWR-alternativet. Många av de reaktorfysiska och värmetekniska problem som uppställde sig när man valt att direkt satsa på en anläggning i kommersiell storlek kunde dock endast lösas genom att ASEA själva skaffade fram data via experiment- och provningsanläggningar.

Det stora utvecklingssteget avsåg emellertid inte bara kärnkrafttekniken, även de s.k. konventionella systemen ställde krav på nykonstruktion. Detta gällde inte minst turbingeneratoraggregatet. Det största som hittills levererats av STAL-LAVAL och ASEA var Stenungsund om 270 MW, och det gällde sålunda nära en storleksfördubbling av denna typ av radialaxialturbin. Härtill kom nya arbetsförutsättningar i form av hög fukthalt i den direkt från reaktorn kommande mättade radioaktiva ångan.



För beställaren OKG låg risktagandet på ett annat plan än hos leverantören, för vilken ju risken begränsades till kontraktsbeloppet.

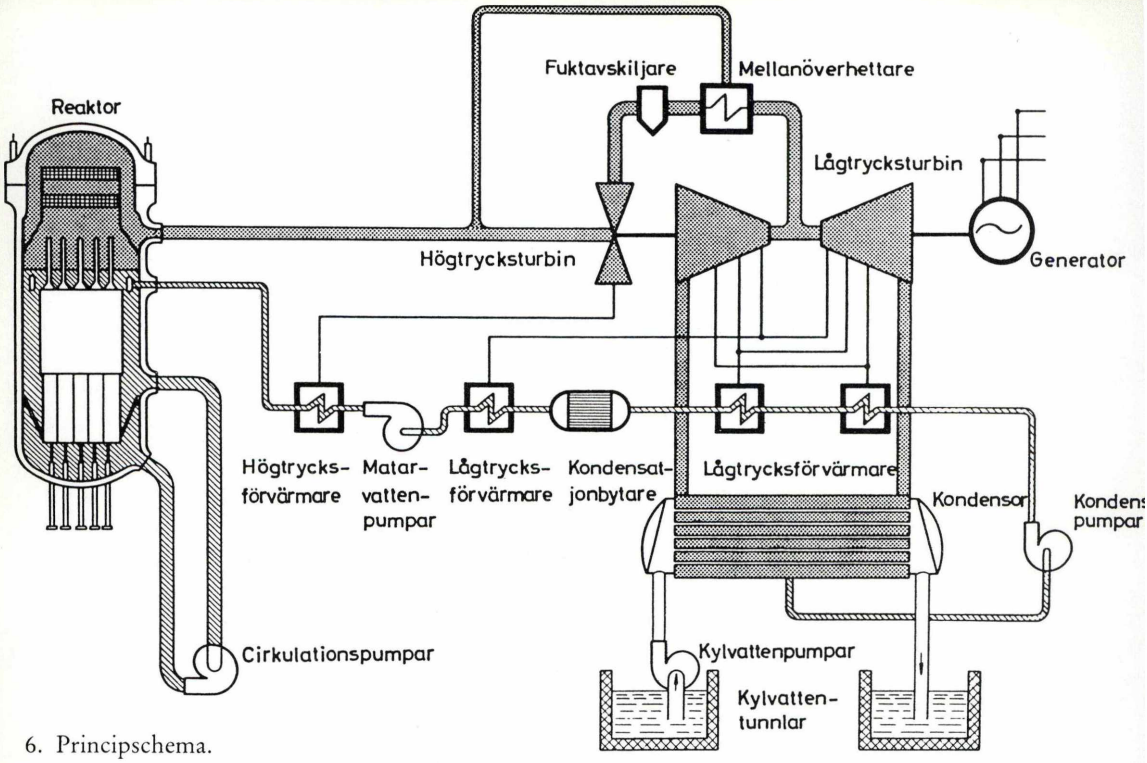


5. Oskar I i transparent perspektiv.

Oskarshamnsverket skulle nämligen för de i OKG ingående kraftbolagen år 1971 komma att representera omkring 10 % av deras totalt installerade effekt, och en längre försening eller ett misslyckande skulle leda till mycket stora kostnader för att anskaffa eller köpa ersättningskraft, kostnader som i värsta fall skulle kunna flerfaldigt överstiga kontraktssumman. Som yttersta konsekvens, nämligen om tillräcklig ersättningskraft ej stod att erhålla, kunde delägarföretagen komma i ett läge där de inte skulle kunna uppfylla sin leveransskyldighet gentemot kraftabonnenterna, ett livsvillkor för ett kraftbolag.

O I-anläggningens huvuddrag

Anläggningens utformning visas i ett "transparent" perspektiv i fig 5. Det förutsattes redan från början att en utbyggnad med ett andra block – inte nödvändigtvis identiskt med det första – skulle ske, och

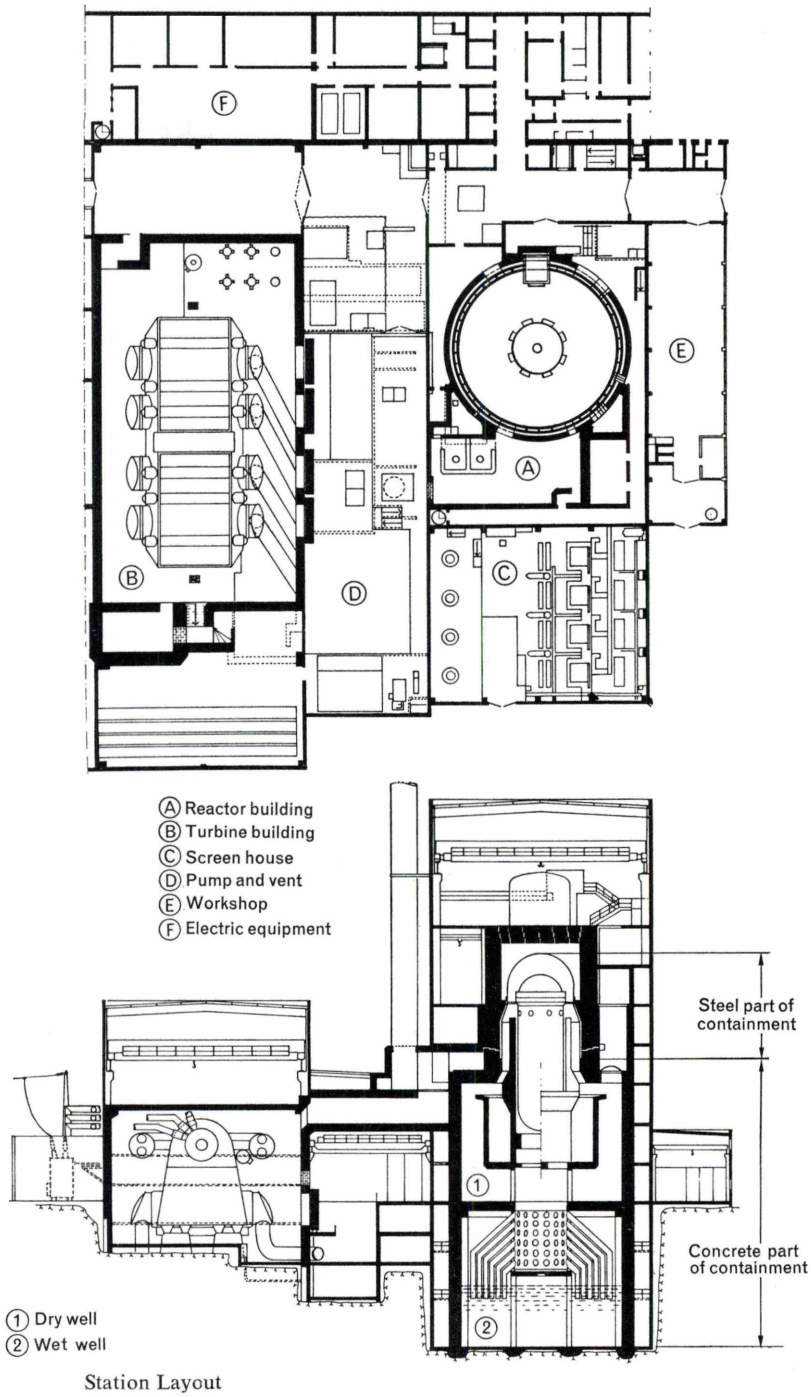


6. Principschema.

layouten var utformad med hänsyn härtill. Principschemat för anläggningen framställdes förenklat i fig 6, ett mera konventionellt flödesschema visas i fig 18.

Stations-layouten och tillämpningen av den s k PS-principen för reaktorinneslutningen framgår av fig 7. Inneslutningen har formen av en stående betongcylinder, som upptill ansluter till ett tryckkärl av stål. PS-principen, som innebär trycknedsättning, "Pressure Suppression", vid haveri i primärkretsen, utnyttjar en tudelning av inneslutningskärlet, en övre, "dry well", och en nedre, "wet well". I den förra befinner sig reaktorkärlet och de trycksatta reaktorsystemen. I den nedre har man dels en vattenbassäng, dels ett gasfyllt utrymme. Från "dry well" sticker ett antal grova rör ner under vattenytan i "wet well's" bassäng. Vid ett brott på ett trycksatt rör kommer en blandning av ånga, gas och vatten att strömma ner i dessa rör, varvid ångan kondenseras och gasen går över i "wet well"-utrymmet och höjer trycket där. Det experimentella underlaget för dimensionering av systemet hade tagits fram i USA av General Electric (GE) och kraftbolaget PG & E i samband med konstruktionen av Humboldt Bay-stationen.

Den anläggning som projekterats av ASEA var i många hänseenden en naturlig utveckling av den linje som börjat i Argonne National Laboratory och sedan fortsatts av GE. Den kan karakteriseras av beteckningen direktcykel BWR med forcerad cirkulation; UO_2-



7. Stations-layout. Reaktorinneslutningens inre diameter 19 m.

bränsle med Zircaloykapsling. Den skiljde sig avsevärt från det enda större kraftverk, Dresden, från vilket det fanns någon längre drifterfarenhet. Dresden-stationen hade "dual-cycle" ångflöde med separat ångdom, bränslepatroner med 6×6 stavgitter samt konventionell reaktorinneslutning i form av en stålsfär. Oskarshamnsverket var mera lik de nya anläggningar som GE nu byggde (Oyster Creek och Nine Mile Point, vilka skulle komma i drift 1969) och offererade. ASEA hade emellertid kommit fram till lösningar som i jämförelse med de amerikanska var betydande förbättringar. Bland dessa kan märkas bränsleelement med 8×8 stavar, absorbatorstavsblad med borrade borkarbidfyllda kanaler, styrdonsmanövreringssystem med kombination av elektro-mekaniskt styrsystem för normaldriften och hydrauliskt snabbstopp, samt ångseparatorer av cyklontyp. Detta redovisas närmare under p 6 nedan. Nytänkandet gällde även stationslayouten och det konstruktiva utförandet av reaktorinneslutningen i förspänd betong, där PS-principen fick en utformning som senare har blivit normerande för BWR-reaktorer världen över.

När det gällde val och specifikation av material har ASEA's konservativa inställning visat sig vara befogad. Detta har lett till att många problem som andra reaktortillverkare råkat ut för, har undvikits. Huvuddata framgår av tabell 1.

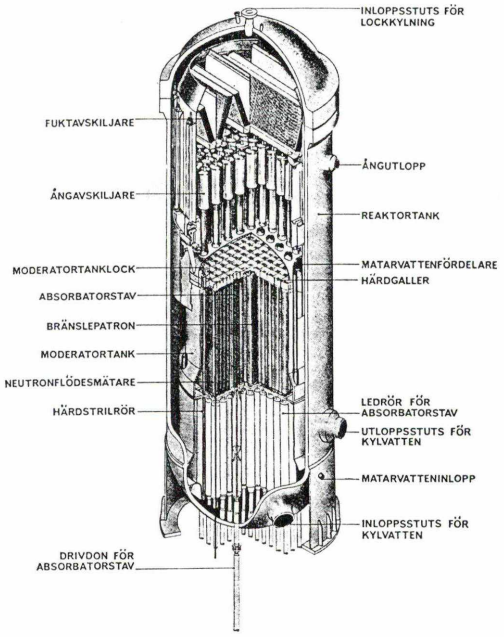
Tabell 1

Termisk effekt	MWth	1 375
Elektrisk effekt	MWel netto	440
Drifttryck	bar	70
Ångtemperatur	°C	286
Cirkulationsflöde i reaktorn, max	kg/s	7 000
Huvudcirkulationspumpar	antal	4
Reaktortank, inre diameter/höjd	m	5,0/17,6
Bränsleladdning	ton UO_2	90
Effekttäthet	kW/kg U	17
Bränslepatroner	antal	448
Styrstavar	antal	112
Reaktorinneslutning, "dry well"	m^3	3 600
Reaktorinneslutning, "wet well"	m^3 gasvol	2 000
D:o konstruktionstryck	bar	4,5
Total byggnadsvolym	m^3	200 000

Reaktor med hjälpsystem

En principskiss av reaktorn visas i fig 8. Reaktorvattnet cirkuleras med ett cirkulationstal av cirka 10, dvs 10 gånger så mycket vatten pumpas genom härden som det utgående ångflödet räknat i kg/s.

Ångan som bildas i härden avskiljs från vattnet medelst av ASEA



8. Reaktorn.

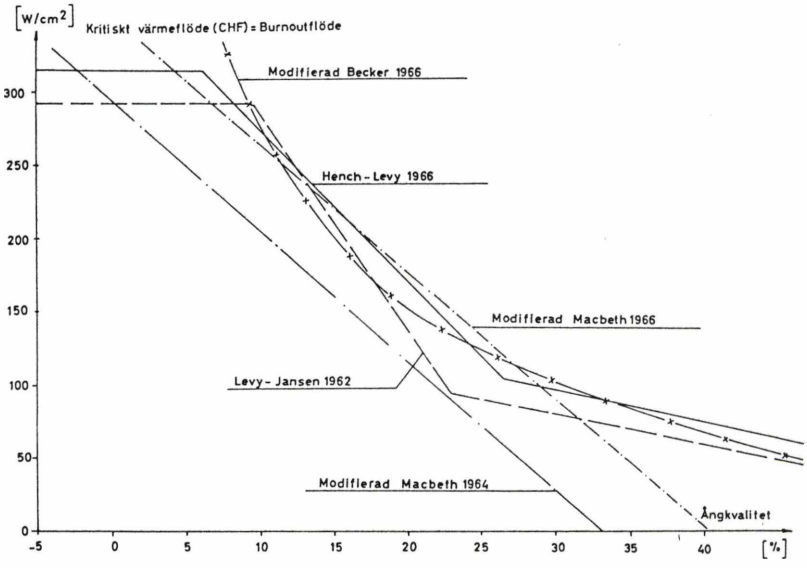
utvecklade ångseparatorer av cyklontyp och torkas innan den från reaktorkärlet leds direkt till turbinen.

Konstruktionsförutsättningar för reaktorsystemet.
Forsknings- och utvecklingsarbete.
Genom de omfattande insatser som gjorts i Sverige i samband med arbetet på tungvatten-linjens Ågesta- och Marvikenprojekt hade man inom ASEA ett gott utgångsläge när det gällde kokarreaktorn för OKG. När man på allvar började studera lättvattentekniken en bit in på 1960-talet ställdes företagets tekniker inför utmaningen att inhämta ett minst femårigt försprång som amerikanska reaktortillverkare hade skaffat sig. Här kom nu till oerhörd stor nytta den generösa inställning som amerikanska regeringen visade när det gällde att fritt ställa till förfogande de data och erfarenheter som framkommit under det forsknings- och utvecklingsarbete och från de experimentanläggningar som bekostats helt eller delvis med offentliga medel. Det gällde i första hand vad som skedde vid Argonne National Laboratory. Stor nytta hade man också av OKG's amerikanska konsulter, Nuclear Utility Services (NUS), som på ett konstruktivt och positivt sätt granskade ASEA's konstruktioner. Däremot kunde man givetvis inte få alla data som framkommit vid de av enskilda företag bekostade projekten, såsom exempelvis Vallecitos-reaktorn och Dresden-stationen, och under GE's utvecklingsarbete för de nybeställda kärnkraftverken Oyster Creek och Nine Mile Point.

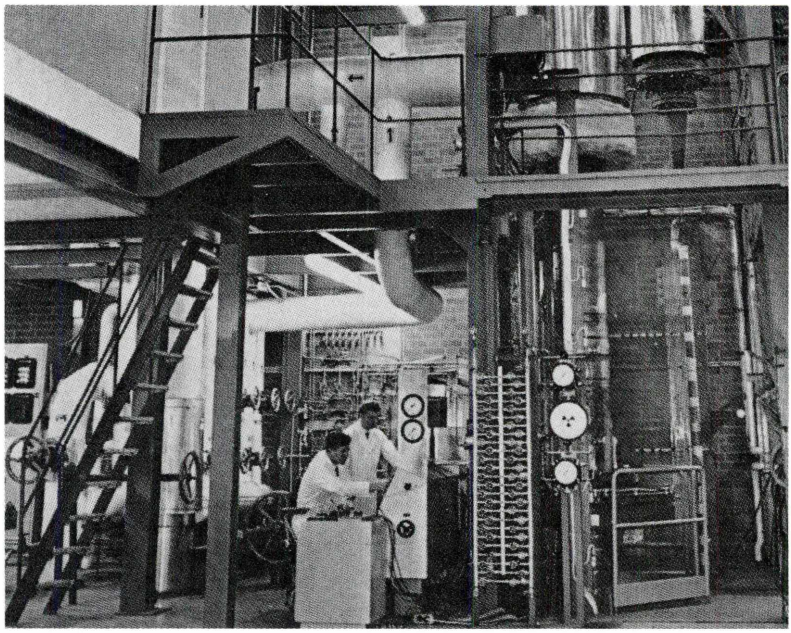
Det var därför nödvändigt att genomföra ett omfattande eget utvecklings- och provningsarbete med användning av inom landet befintliga resurser samt tillskapa nya sådana.[8]

För de reaktorfysiska härdberäkningarna hade man inga större svårigheter att ta fram egna program. I jämförelse med tungvatten-natururanlinjen erbjöd också anrikat uran en mycket större frihet i konstruktionsarbetet. Eftersom en ledande princip för detta arbete var att se till att man hade ordentliga marginaler på den säkra sidan, hade man stor nytta av att man vant sig vid de hårda restriktioner ifråga om neutronekonomi som den tidigare inriktningen inneburit. Det var emellertid också nödvändigt att i egna experimentuppställningar få beräkningarna verifierade. Detta skedde bl a i R2-0-reaktorn och KRITZ-uppställningen i Studsvik. Bestrålningsprovning av bränslestavar skedde i Studsviks R2 samt i Halden-reaktorn i Norge och i Ågesta.

Det var inom områdena hydrodynamik och värmeöverföringsteknik som egna provningsanläggningar var som mest nödvändiga för det pågående konstruktionsarbetet. Värmetekniken bygger på empiriska samband såväl för tillämpningar inom kärnkrafttekniken som inom andra områden. Som exempel kan man ta ett stort antal burnout-korrelationer,[9] dvs empiriska samband som anger det kritiska värmeflödet som funktion av olika system-parametrar, se fig 9. Det krävs därför alltid ett omfattande experimentarbete för att kunna verifiera



9. Jämförelse mellan olika burnout-korrelationer vid systemparametrar typiska för en lättvattenkokare. Det krävs omfattande experimentarbete för att få fram de samband som gäller i den konstruktion man avser utveckla. Cnut Sundquist, ABB-ATOM.



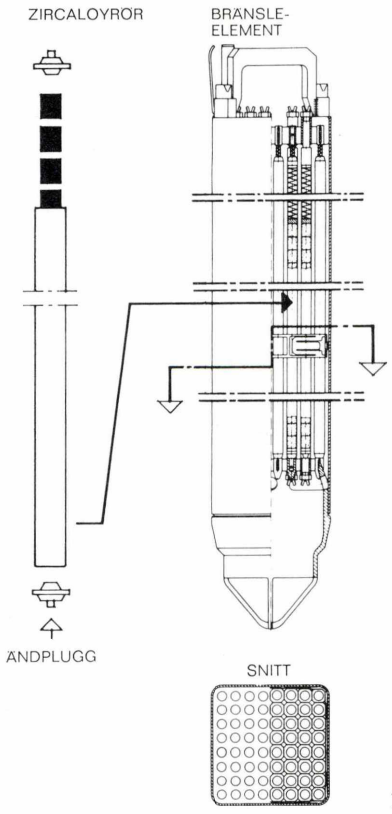
10. ASEA-ATOM's testrigg FRIGG i Västerås, som togs i drift 1966. Här kan elektriskt uppvärmda fullskaliga bränsleelement testas under tryck upp till 100 bar. Den tillgängliga eleffekten är 9 MW. Foto ur ABB-ATOM bildarkiv.

dessa samband, eftersom försöksresultaten är starkt betingade av de parameterkombinationer för vilka de framtagits. Även om prov i en reaktor ger realistiska förhållanden, så hade man tyvärr begränsade möjligheter till mätningar. Därför gjordes kretsförsök med elektriskt upphettade attrapper såväl i Studsvik som hos ASEA i Västerås. Försök med fullskaleattrapper utfördes på den senare platsen i den nya FRIGG-kretsen, som togs i drift 1966. Kretsen som har 9 MW tillgänglig eleffekt vid upp till 100 bars tryck förseddes med en omfattande instrumentering, bl a för mätning av ångvolymen (void) med gammastrålar.

När man så småningom kommit så långt som till driftprovningsskedet, gav mätningar på fyra instrumenterade bränslepatroner insatta i själva O I-reaktorn synnerligen värdefulla erfarenheter. Här kunde man mäta neutronflöde och voidhalt vid varierad strypning. ASEA-ATOM hade nämligen varit förutseende nog att förse härden med lösa, utbytbara strypningar vid ingången till bränslepatronerna. (Till skillnad mot GE som hade fasta dylika.)

Bränslepatroner; härduppbyggnad[10]

Bränslepatronen är uppbyggd av 64 bränslestavar i ett 8 x 8 gitter vilka är inneslutna i ett höljerör av Zircaloy-4 med kvadratiskt sektion, se

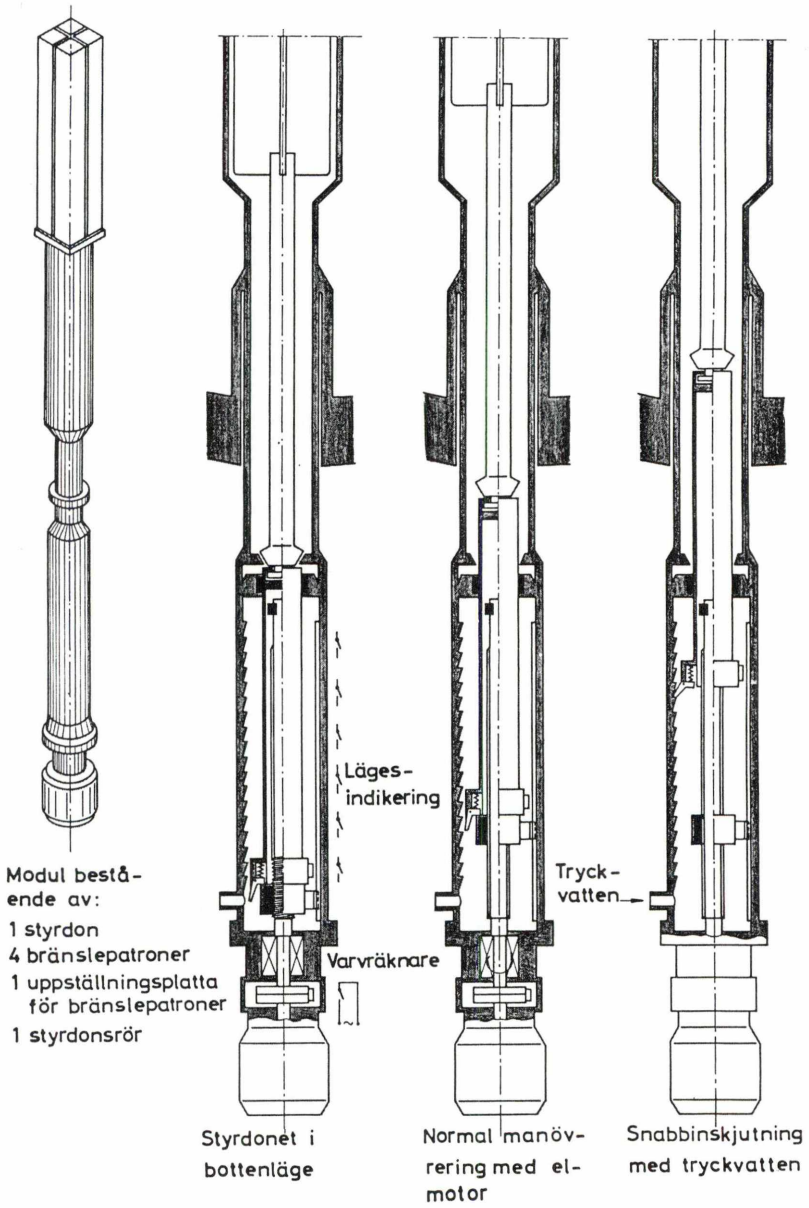


11. Bränsleelement.

fig 11. Ett styrstavsledrör bildar tillsammans med fyra bränslepatroner en modul, som framgår av fig 12. Huvuddata framgår av tabell 2.

Tabell 2

Anm		
Bränslematerial	UO_2	
Medelanrikning 1:a härd	vikt-%	2,0
Medeleffekt per patron	MW	3,1
Kapslingsmaterial	Zircaloy-2	
Kapslingens tjocklek	mm	0,8
Bränslestavar, ytterdiameter	mm	12,25
Centrumavstånd mellan stavar	mm	16,3
Genomsnittlig ytvärmebelastning	W/cm^2	34
Maximal ytvärmebelastning	W/cm^2	100
Burnout-marginal		1,7
Bränslets medeltemperatur	°C	625
Bränslets centrumtemp, max	°C	1 900
Medelutbränning i initialhärden	MWd/ton U	15 000 garanti
Medelutbränning i härd nr 2	MWd/ton U	22 000 garanti



12. Styrdon. Normal manövrering med elmotor. Snabbinskjutning med tryckvatten.

I jämförelse med GE's bränsle innebar visserligen ASEA's 8 × 8 gitter en högre tillverkningskostnad. Detta kompenserades mer än väl av kostnadsminskningen på grund av den högre effekttätheten. Ändå var burnout-marginalen större i ASEA-bränslet.

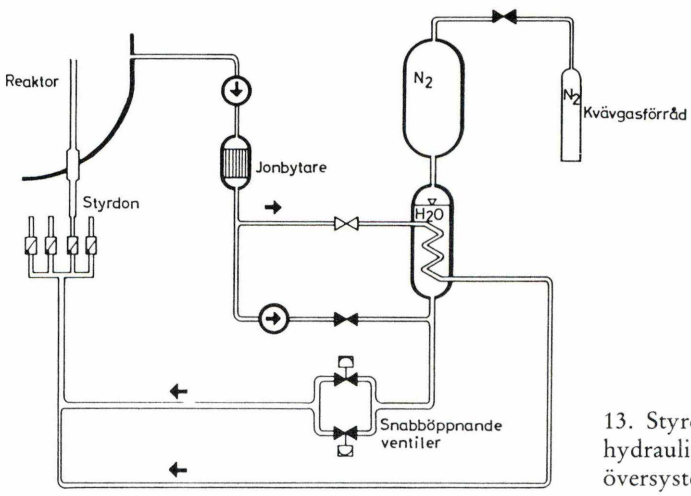
Ur kraftekonomisk synpunkt bör i det svenska kraftsystemet med dess stora andel av vattenkraft bränslebyte ske årsvis i samband med

avställning för översyn. Vid fortfarighetstillstånd i driften – approximativt efter den den tredje omladdningen – förutsattes därför omladdning av 20 % av härden per år. Detta innebär schematiskt att härden skulle komma att bestå av fem delar av olika ålder. För att uppnå optimal neutronekonomi valde man därför i O I att för initialladdningen simulera detta förhållande vid fortfarighetstillstånd genom att i denna använda bränslepatroner med fem olika anrikningar, varierande från 1,4 % till 2,6 %. (Detta sofistikerade förfarande har man frångått i senare reaktorer.)

Styrdon

Reaktoreffekten varieras normalt genom ändring av cirkulationspumparnas varvtal. För verkets start och avställning samt för att styra effektfördelningen i reaktorhärden användes korsformiga styrstavar. Vid snabbavstängning av reaktorn användes ett hydrualiskt system. ASEA's konstruktion för Oskarshamnsreaktorn har en extra säkerhet genom att den till skillnad från vad som användes i GE's kokarreaktorer har ett system för normal, långsammare manövrering, som är av en helt annan princip, nämligen elektromekanisk, och därmed fullständigt oberoende av det hydrauliska snabbinskjutningssystemet. Drivdonet är uppbyggt av elmotor med kuggväxel, skruv, mutter, kolvstång och styrrör samt lägesindikeringsutrustning. Normalt vilar kolvstången på muttern och förflyttar sig alltså med denna. Vid snabbinskjutning påverkas kolvstången av hydraultrycket, varvid den tillsammans med styrstaven skjutes uppåt och lämnar sitt läge på muttern. Utformningen av styrdonets hydraulsystem framgår av fig 13.

Styrstavarnas absorbatordel är korsformig och utförd svetsad i rostfritt stål med i bladen borrade horisontella kanaler som fylls med

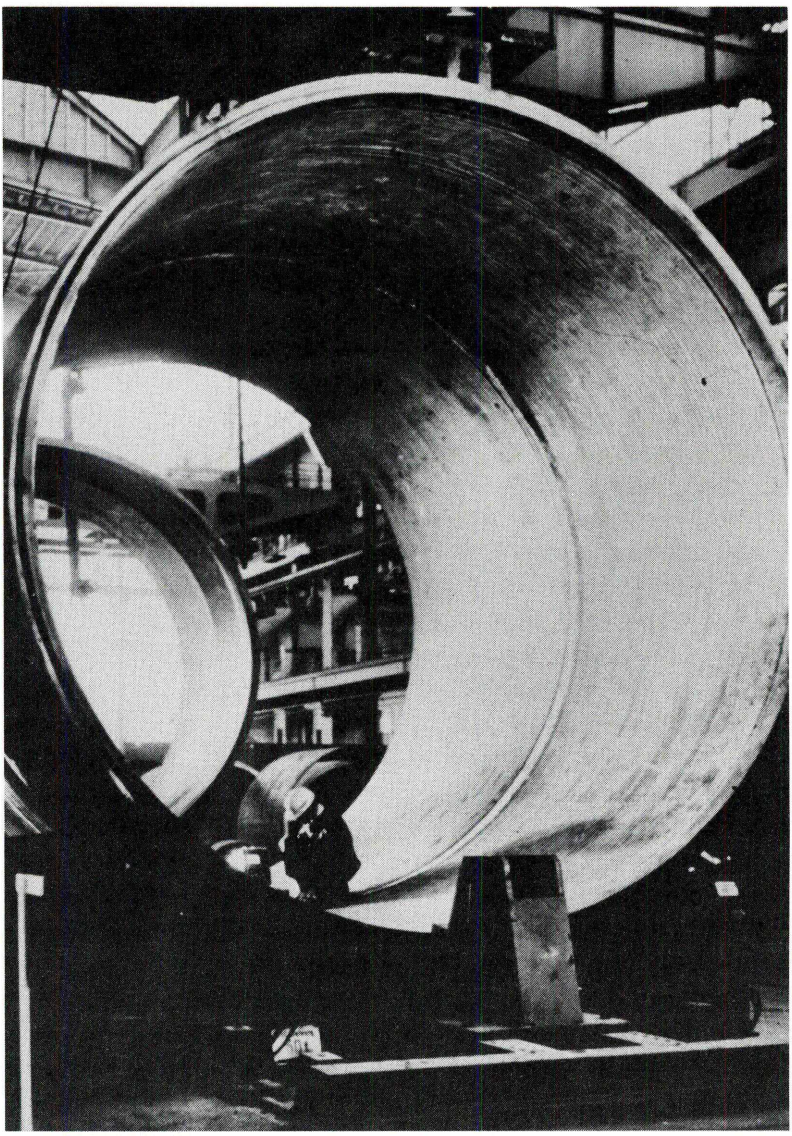


13. Styrdonens hydrauliska manöversystem.

borkarbid. Hålen är öppna inåt mot det centrala hålrummet som bildas av de hopsvetsade bladen. Detta ger utrymme för det helium som bildas vid bestrålningen. Detta är, som ovan angetts, en originalkonstruktion av ASEA-ATOM.

Reaktortanken

Anbud intogs från olika utländska tillverkare. Med hänsyn till godstjockleken, 131 mm, och totalvikten 400 ton (dubbelt så mycket som



14. Tillverkning av reaktortanken hos GuteHoffnungshütte i Oberhausen. Påläggssvetsning av rostfritt i ett mantelsvep. Foto ur ABB-ATOM bildarkiv.

Marviken-tanken, tillverkad i Degerfors) fanns vid denna tid ej tillräckliga inhemska verkstadsresurser. Ordern gick till det tyska företaget GuteHoffnungshütte AG (GHH).

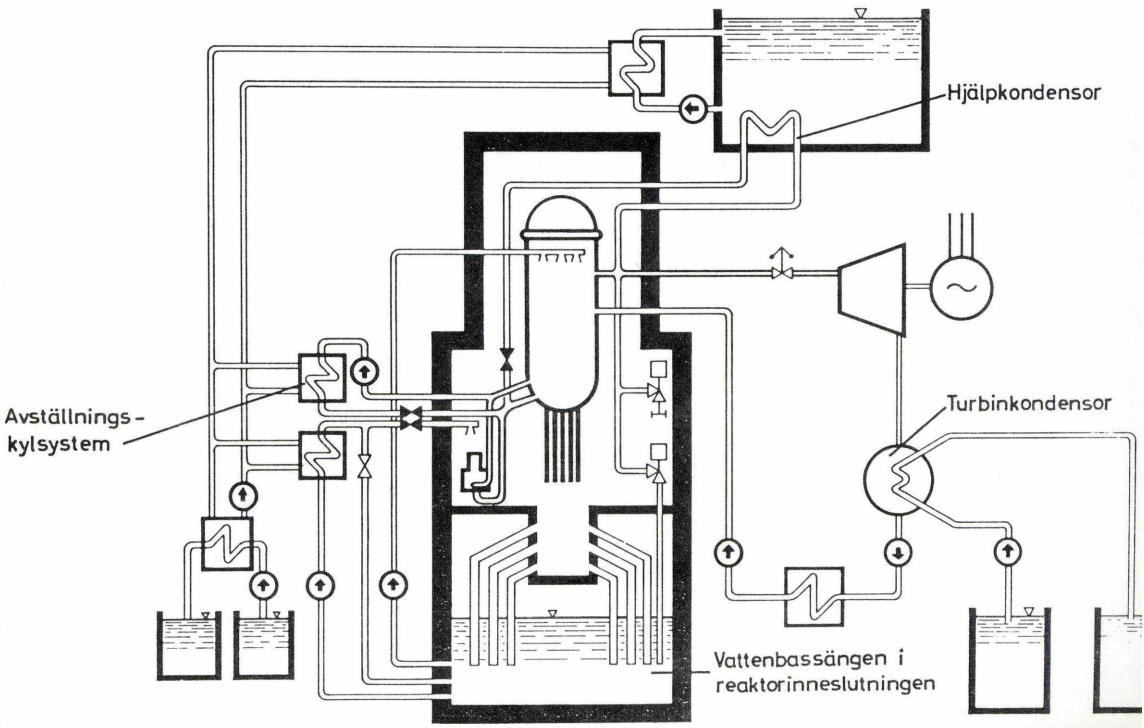
Materialet i tanken var ett Mn-Mo-legerat tryckkärlsstål enligt den amerikanska specifikationen för ASTM A 302 Grade B, ett välbeprövat material som använts i ett stort antal tankar. Alla vatten- och ångberörda ytor pläterades med rostfritt stål av 18/8-typ.

Den cylindriska manteln hos tanken uppbyggdes av fyra svep, tillverkade av plåtar som bockats till cylindrisk form och svetsats i längdriktningen med elektroslaggmetoden. Svepen svetsades samman med maskinell pulverbågsvetsning. Bottengaveln och locket uppbyggdes av pressade och hopsvetsade plåtar.

Kraven på material och tillverkningsmetoder var noga specifiserade i samband med upphandlingen av tanken, och uppföljning av tillverkningen skedde kontinuerligt av ASEA och OKG. På inrådan av OKG's konsult NUS anlitades även expertis från South Western Research Institute (SWRI), San Antonio, Texas. Det visade sig att GHH ej i tillräcklig grad insett innebörden av beställarens krav – bl a hade man ej inplanerat normalisering av mantelsvepen – vilket ledde till avsevärda förseningar i förhållande till avtalets tidsplan.

Parallellt med tanktillverkningen tog man fram metoder och utrustning för återkommande inspektion av reaktortanken. Här gjordes en pionjärinsats av SWRI i samarbete med Tekniska Röntgencentralen,

15. Reaktorns hjälpsystem: tillgängliga värmesänkor.



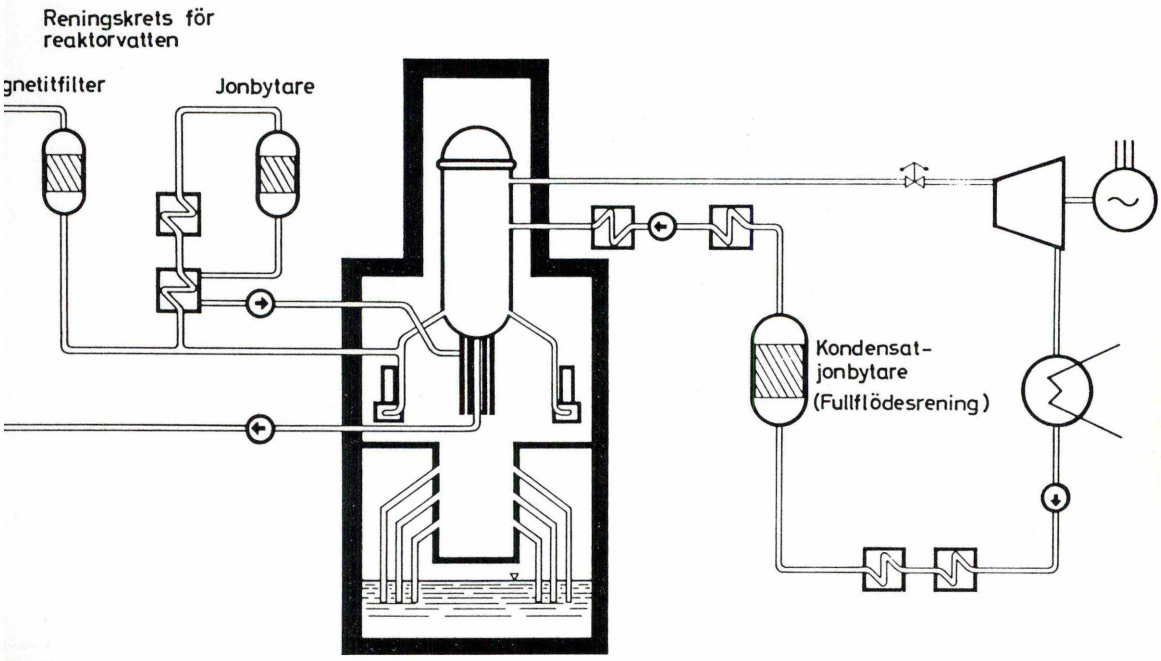
TRC, genom att få fram en utrustning för automatisk inspektion med ultraljud.[11] Denna användes också för en första "finger-printing" av tanken för att få relevanta ingångsdata.

Reaktorns hjälpsystem
Till dessa räknas följande system.

1. Huvudsystem
   Omfattar system för matarvatten, forcerad cirkulation, avblåsning samt hjälpkondensor.
2. Kylsystem m m
   Omfattar kylsystem för avställd reaktor, sprinkler system för primärutrymme, d:o för reaktorhärden, kyl- och reningssytem för bränsleförvaringsutrymme, system för reaktorvärmning och för stationens hetvattenförsörjning samt tempereringssytem för reaktortankens lock.
3. Reningssystem för reaktorvatten och för kondensat.
4. Anläggningar för bortförande och behandling av radioaktivt avfall
   System för radioaktiva avloppsgaser, system för behandling av vätskeformigt aktivt avfall, utrustning för behandling av fast aktivt avfall samt dekontamineringssystem.
5. Övriga system
   Omfattar system för borinsprutning, för dränage, för läckövervakning samt yttre hydraulsystem för drivdon.

Här är ej platsen att beskriva förutsättningarna för eller utformning av alla dessa system. Som illustration visas i fig 15 en bild av de viktigaste

16. Reaktorns hjälpsystem: vattenrening i primärkrets.



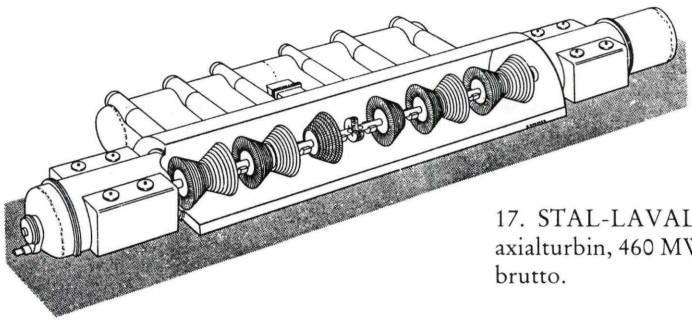
kylsystemen, och i fig 16 vattenreningssystemen. I övrigt hänvisas till ASEA-ATOM's specialrapporter.

Systemkomponenterna upphandlades efter omsorgsfull utvärdering av leverantörernas kapacitet och kvalitetssäkringsrutiner. Av större komponenter kan nämnas huvudcirkulationspumparna från engelska Hayward Tyler och matarvattenpumparna från tyska KSB. Rörmontaget utfördes av Mannesman AG.

Reglersystem och kontrollutrustning

Reglering av den från ett kärnkraftverk utmatade effekten sker medelst reglering av neutronflödet, eftersom den termiska reaktoreffekten är direkt proportionell mot detta. Vid konventionella kondensverk möts variationer i belastningen genom manövrer i turbinpådraget. Vid en tryckvattenreaktor kan regleringen ske på samma sätt, eftersom en ökning i turbinpådraget sänker temperaturen i ånggeneratorerna och därmed temperaturen i primärkretsen. Detta kommer på grund av den negativa temperaturkoefficienten att öka reaktoreffekten, som följer belastningen utan nämnvärd översväng. Man talar om att reaktorn är "slav till turbinen". Vid en kokarreaktor med direkt cykel är emellertid förhållandena annorlunda på grund av den negativa void (ånghalt) -koefficienten, ett ökat turbinpådrag ger en sänkning av trycket, större ångblåsor, sämre moderering och en minskad effekt. Effektregleringen måste därför ske på annat sätt. Detta ledde till den s k dualcycle-principen som begagnar sig av variation av underkylning i härdinloppet, och som användes i GE's första kommersiella reaktorer Dresden och Garigliano. Vid en direktcykelkokare använder man i stället systemet "turbinen slav till reaktorn". Detta innebär att alla order om ändrad stationseffekt passerar via reaktorn, turbinen tar den ånga som reaktorn producerar på så sätt att reaktortrycket hålles konstant. Det normala sättet för reglering av reaktoreffekten är ändring av kylflödet genom reglering av varvtalet hos huvudcirkulationspumparna, i andra hand sker det genom manövrering av absorbatorstavarna.

O I kan med pumpreglering regleras kring effektens ärvärde inom ett effektintervall av 30 % av detta värde. Effektreglersystemet består av en effektregulator och en turbinregulator. Effektregulatorn påverkar hydraulkopplingar till en frekvensomformare, kopplad till huvudcirkulationspumparnas motorer. Styrsignal erhålles under normal drift antingen genom automatisk order från det yttre nätets frekvens eller genom en manuell börvärdesändring av operatören. Turbinregulatorns uppgift är att hålla reaktortrycket konstant. Styrsignalen utgörs av differensen mellan aktuellt och önskat tryck i reaktorn.



17. STAL-LAVAL's radial-axialturbin, 460 MW el brutto.

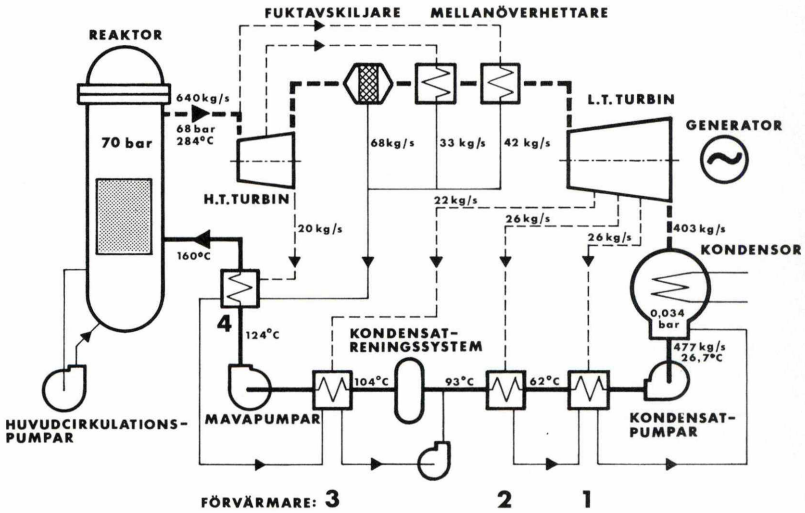
Turbin-generator-anläggningen

Turbinen för O I är av STAL-LAVAL's kombinerade radial-axialtyp för 3 000 r/min. Den består av en högtrycksturbin av motrotationsradialtyp och 10 parallella lågtrycksturbiner (5 på vardera axeln) av axialtyp. Se fig 17. I överföringsrören mellan radialdelen och axialdelarna är fuktavskiljare och mellanöverhettare inbyggda. Turbinrotorerna är kopplade till var sin generator. Dessa är konventionellt vätgaskylda och generatorns statorlindning är direktkyld med vatten. Hela aggregatet uppbärs av kondensorn jämte två generatorpallar. Huvuddata framgår av tabell 3 samt flödesschemat fig 18.

Tabell 3

Märkeffekt	MW	460
Nettoeffekt	MW	440
Nettoverkningsgrad	%	32,1
Ångflöde	kg/s	640
Fukthalt i primärånga	%	0,5
Ångdata, tryck/temp	bar/°C	
före högtrycksturbin		68/284
efter högtrycksturbin		6,7/163
i kondensor		0,038/28
Avloppsskovelns längd	mm	730
Kondensor: material	aluminium-mässing (1979 bytt till titan)	
flöde	m^3/s	20
temphöjning	°C	11
dumpningskapacitet	%	110
Förvärmare		
lågtryck	antal	3
högtryck	antal	1
Turbingeneratoraggr längd	m	51

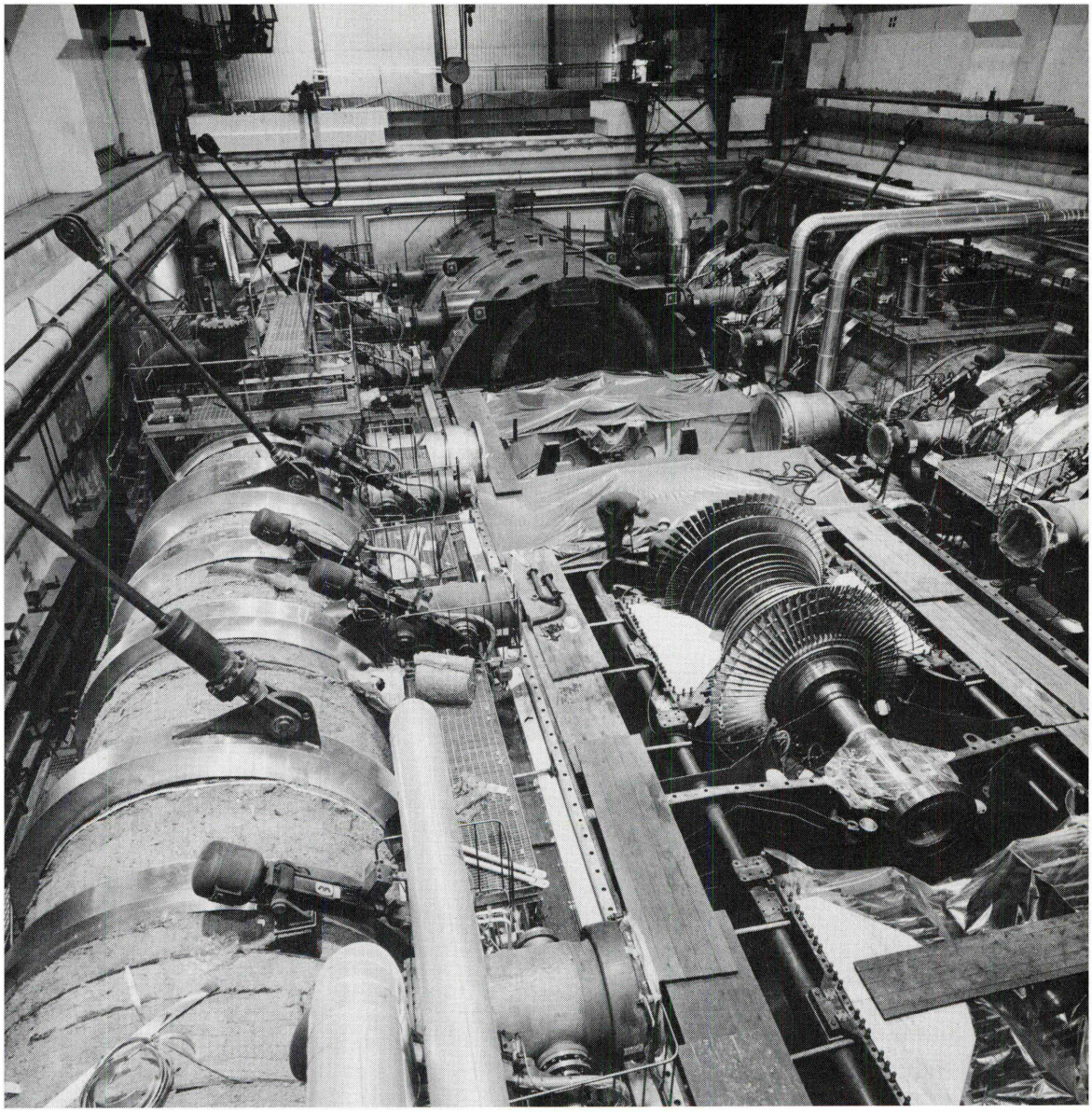
Ett speciellt drag för den turbin som skall drivas med ånga från en direktcykel kokarreaktor är att turbinlasten följer reaktorns ångpro-



18. Flödesschema.

duktion på sätt som beskrivits i föregående avsnitt. För att klara snabba nätstörningar måste därför färskångan dumpas direkt till turbinkondensorn. Detta löses med ett system av 10 dumpventiler med en sammanlagd kapacitet av 110 % av ångflödet vid full effekt. Beställarens krav på denna turbin- och dumpventilreglering var hårda, ett nätbortfall måste klaras utan att reaktorn stoppas och turbinen skall kunna upprätthålla husturbindrift, dvs klara stationens eget behov. Vidare skulle man kunna av- och pålasta 60 MW momentant genom omkastning av ångflödet mellan turbinen och dumpventilerna vid uppbyggnad av eget nät med endast O I-blocket. Vid utvecklingsarbetet för dumpventilerna hade man redan en utgångspunkt i de försök som utförts för liknande anordning i Marvikenprojektet.

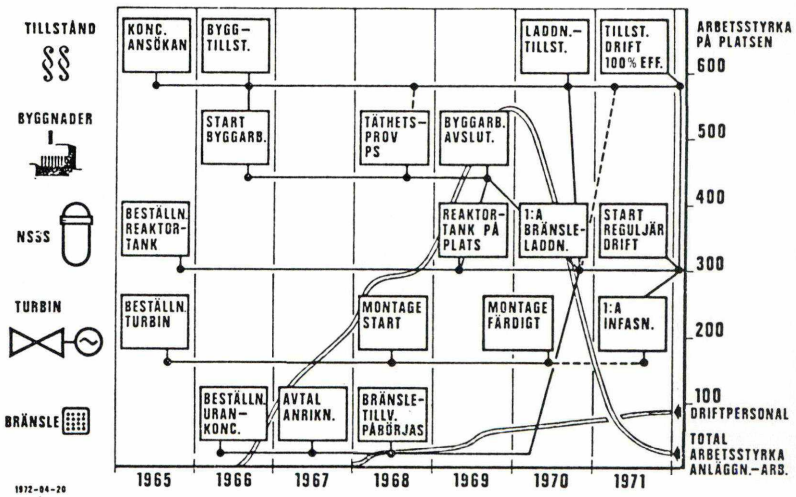
STAL-LAVAL's turbinkonstruktion byggde på kombinationen av företagets unika radialturbin av Ljungströmtyp med axialturbinsteg av konventionellt slag. Man hade successivt lyckats gå upp i storlek ända upp till 270 MW vid Stenungsundsverket, men steget upp till O I's 460 MW inklusive omkonstruktionen för nukleär mättad ånga var ganska djärvt. För att möta befarade problem härrörande från den mättade ångan hade högtrycksdelen byggts upp på ett sofistikerat sätt med material motståndiga mot erosion. Vidare hade stor omsorg lagts ned på god dränerbarhet. Resultatet kom emellertid ej att motsvara förväntningarna och kraftverkets driftstillgänglighet under de första åren blev mycket lidande av ständiga turbinstopp. Efter vidtagna ändringar och förbättringar kom dock maskinen från mitten av år 1975 att uppvisa mycket tillfredsställande driftresultat, se vidare nedan under p 9.



19. Montage av turbinen. Totallängd 51 m. Foto ur OKG bildarkiv.

Byggnadsskedet och idriftsättningen. Slutkostnad

De viktigaste milstolparna i *byggnadsskedet* framgår av den översiktliga *tidplanen* fig 20. Härav framgår att den totala tiden från starten av byggnadsarbetena på platsen i juni 1966 till driftstart med kontrakterad effekt i början av 1972 var drygt 5½ år. Detta synes mot bakgrund av dagens förhållanden var en god prestation, framför allt som det rörde sig om ett förstlingsverk, men enligt det ursprungliga avtalet skulle faktiskt leveransdagen ägt rum halvtannat år tidigare. Planen visar huvudsektorerna tillståndsbehandling, byggnader, reaktordelen, turbindelen och bränsle.

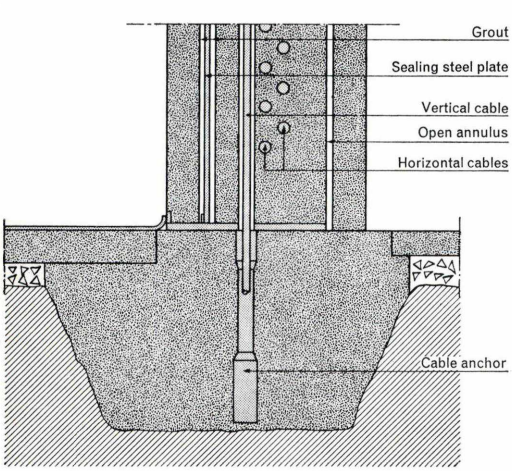


20. Tidplan.

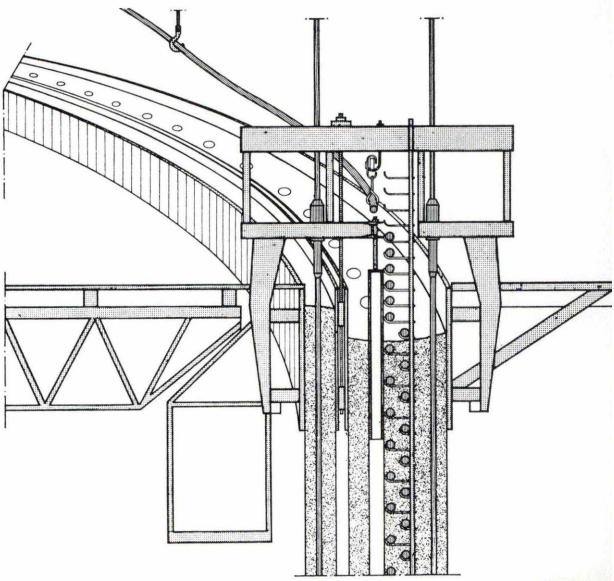
Byggnadsarbetena med Armerad Betong som entreprenör genomfördes i god ordning. Bland de tekniskt sett avancerade byggnadsdelarna märktes framför allt reaktorinneslutningen i betong med dess koncentriska väggar med spalt för tätplåt, utförd med hjälp av glidformsgjutning. Se fig 21. Metoden patenterades av entreprenören, och användes senare i flera andra anläggningar.

Reaktor med hjälpsystem blev den tidsstyrande sektorn. Här blev,

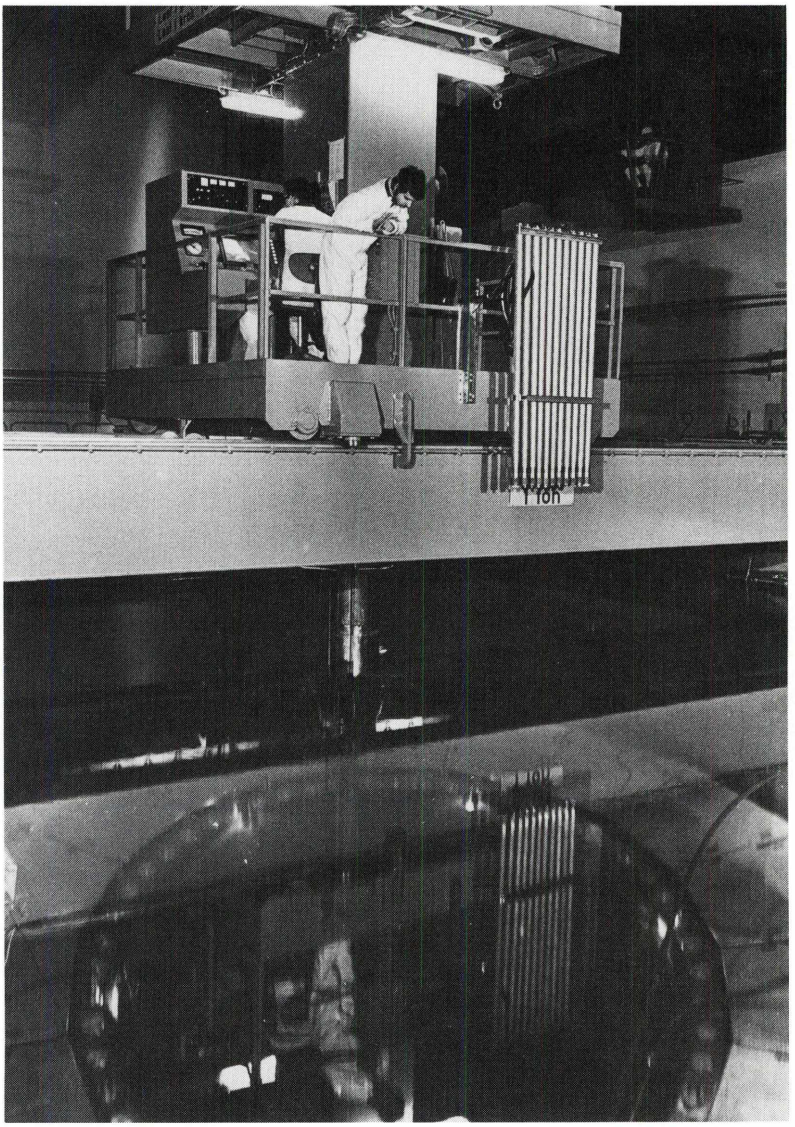
21. Reaktorinneslutningen. Glidformsgjuten, förspänd betong. Total väggtjocklek 1,3 m, med två koncentriska slitsar, varav den yttre bibehålls öppen. I den inre placerades tätplåt som tillverkades i ringar vilka successivt hopsvetsades och sänktes ned uppifrån. Därefter groutades mellanrummet.



Detail of containment wall and bottom joint



Slip form arrangement for containment wall



22. Laddning av reaktorn. För att uppnå kriticitet behövdes 17 bränslepatroner, helt enligt de reaktorfysikaliska beräkningarna. Foto ur OKG bildarkiv.

som tidigare beskrivits, GHH's leverans av reaktortanken försenad med 10 månader. Vidare tog idrift-tagningen från första kriticitet, som ägde rum i december 1970, betydligt längre tid än som ursprungligen förutsetts. Nu efteråt kan man medge att den tidsförlängningen utnyttjades väl genom att OKG's driftpersonal under detta skede fick möjlighet att i detalj lära känna stationen och lära sig de olika systemens och komponenternas egenheter. Detta kom så småningom att ge utdelning i mycket fin driftstatistik.

23. Hamnen kom väl till pass. Här ses dels fartyget "Regina" där många rörmontörer var logerade, dels pensionerade fregatten "Gävle", vars pannor gav ånga för den första intrimningen av turbinen. Foto ur OKG bildarkiv.


Kärnkraftsbyggen i slutspurt

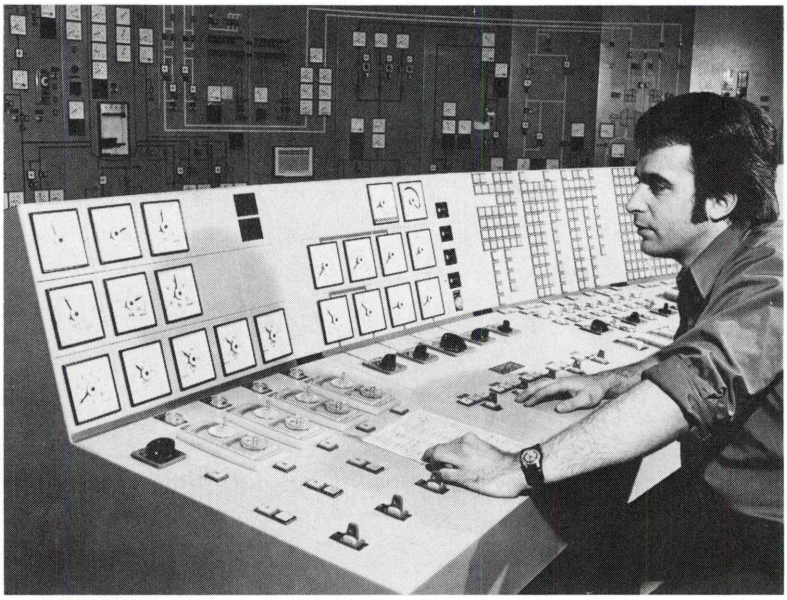
Oskarshamn blir först


Kärnkraftsepoken inledd

Start i Oskarshamn

Turbinen kunde monteras färdig i tid, men saknade då ånga för provning. Detta avhjälptes delvis genom att ASEA från marinen inköpte den utrangerade fregatten "Gävle", vars pannor kunde ge ånga som räckte till att köra med 5 % av fulleffekt, tillräckligt för balansering av maskinen. System som krävde ånga med rätta driftdata fick dock vänta på provning tills reaktorn kom upp i högre effekt. Då uppträdde diverse krångel, bl a vibrationer i turbinpådragssystemet. Det skulle sedan visa sig att turbinen skulle komma att svara för den största avbrottsfrekvensen hos stationen, se vidare därom i avsnitt 10.

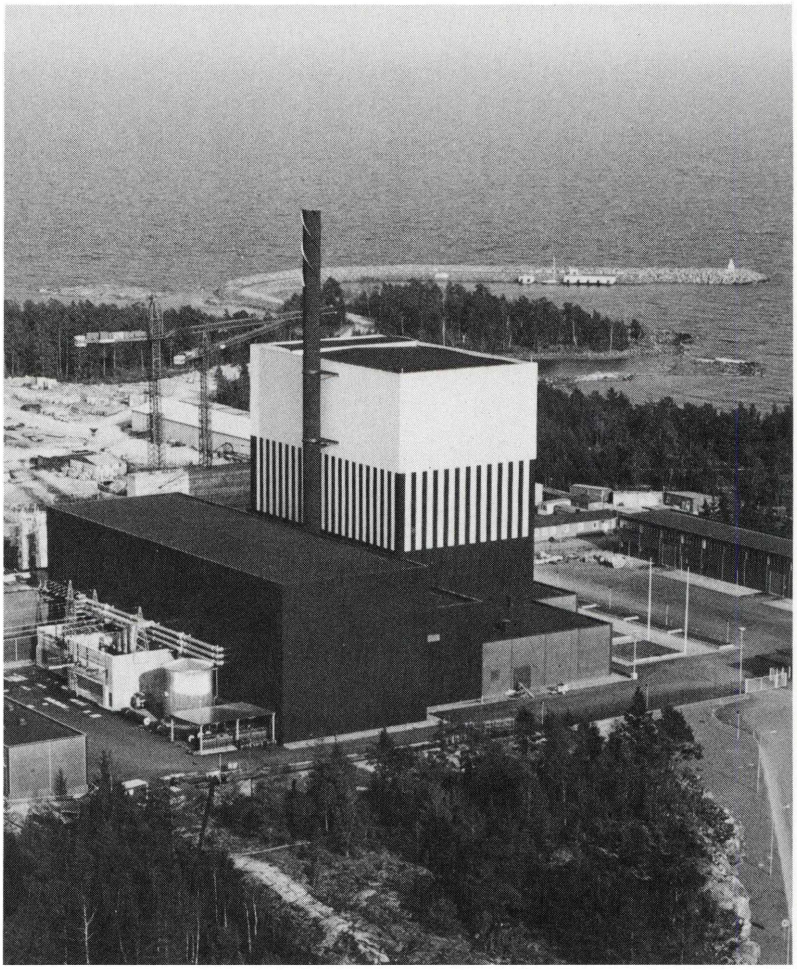
Första infasning på kraftnätet skedde den 19 augusti 1971. Tillverkningen av *bränslet* påbörjades i maj 1968 i ASEA's bränslefabrik i Västerås. Den hade organiserats med tillämpning av de tillverkningsmetoder som med framgång använts vid AB Atomenergis (AE) tillverkning av bränsle för Ågesta- och Halden-reaktorerna. Den 1 januari 1969 bildades bolaget ASEA-ATOM, till vilket AE's bränsleavdelning överfördes. Detta nya företag övertog ASEA's avtal med OKG.



24. Första infasningen på kraftnätet ägde rum i augusti 1971. I mars 1972 uppnåddes 420 MW effekt, vilket då var svenskt rekord för ett kraftblock. Så småningom kom man upp i 460 MW brutto, vilket gav bonus åt leverantören. Foto ur OKG bildarkiv.

Dessförinnan hade uranet anskaffats av OKG genom inköp 1966 av urankoncentrat från Utah Mining & Construction Co, dess konvertering till hexafluorid hos Allied Chemical och anrikning av amerikanska Atomic Energy Commission (AEC). Det sistnämnda skedde enligt ett avtal som var det första som AEC tecknat med ett enskilt kraftföretag. AEC's ordförande, svenskättlingen och nobelpristagaren Glenn Seaborg, uttryckte vid undertecknandet 1967 sin tillfredsställelse över att detta skedde med "one of our good friends abroad", och att det var ett bevis på den vikt man fäste vid USA's nya policy att genom legoanrikning tillhandahålla anrikat uran för kraftprojekt utomlands.

År 1972 kunde vid Svenska Kraftverksföreningens årsmöte i april – ett traditionsrikt evenemang för landets energifolk – rapporteras att Sveriges första kommersiella kärnkraftverk kommit i drift med över 400 MW effekt.[12] Den 18 maj skedde den högtidliga *invigningen* av Oskarshamnsverket, som förrättades av Konung Gustaf VI Adolf i närvaro av ledande representanter för myndigheter, tillverkande industri samt inländska och utländska expertorgan. Det var det andra tillfället i historien som ett statsöverhuvud invigde ett kärnkraftverk. Första gången var när drottning Elizabeth II invigde det engelska Calder Hall år 1957.



25. Oskar I står färdigt och byggnadsarbetena för Oskar II är redan i full gång. Foto ur OKG bildarkiv.

Den totala kostnaden för O I, inklusive första bränsleladdning, högspänningsutrustning, etablering och installationer på förläggningsplatsen samt räntor på externt kapital under byggnadstiden, uppgick till 493 Mkr.

Driftserfarenheter. Ombyggnader och förbättringar

De tre första driftåren kännetecknades av många mindre barnsjukdomar och några större tekniska fel. Inom den senare kategorin kan följande i korthet beskrivas.

Det som först kom att allvarligt påverka produktionen var ett flertal skador på och omkring *turbinens ångpådrag* med utmattningsbrott på grund av vibrationer. Det visade sig svårt att finna källan till dessa vibrationer. Efter ett omfattande undersökningsprogram vari

bl a medverkade en av STAL-LAVAL tillkallad utomstående expert, en professor i strömningsteknik med kyrkorglar som hobby, kunde denne konstatera likheten med orgelpipor i form av resonans-svängningar mellan ett av ånginloppen och ventilbalken. Genom pluggning av detta inlopp och förstärkning av ventilbalken var problemet löst.

Inte mindre än fem gånger under tidsperioden 1972–75 havererade *radialturbinen* mer eller mindre allvarligt. Genom en radikal konstruktionsförändring av den inre skovelringen, den tillverkades nu som massivt stålgjutgods och togs i drift i september 1975, har maskinen skött sig exemplariskt (i maj 1990 ca 85 000 drifttimmar).

Kondensorns ursprungliga tuber av aluminiummässing utbyttes på grund av tilltagande läckage mot titan 1979.

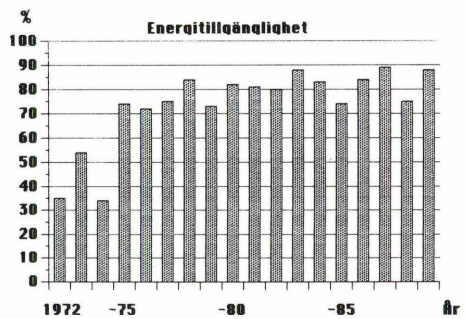
Vid den årliga revisionen och bränslebytet 1974 upptäcktes sprickor i *fördelningsringen för reaktorns matarvatten.* Denna måste omkonstrueras och utbytas, vilket krävde omfattande arbete med hjälp av speciella strålskyddsanordningar i den aktiva miljön och innebar fyra månaders extra produktionsbortfall under detta år.

Reaktorns *fuktavskiljare* visade vid de återkommande inspektionerna ett begynnande sprickmönster, varför en ny omkonstruerad sådan tillverkades och insattes i samband med revisionsavställningen 1980.

Utöver sådana felfunktioner av systematisk natur som här illustrerats mötte man givetvis ett otal smärre komponentfel, exempelvis hos ventiler – det finns 6 500 sådana – som kontinuerligt måste rättas till. Felfrekvensen kunde dock efter hand sänkas till en acceptabel nivå.

Energi-tillgänglighet

Detta reflekteras i förbättring av kraftverkets *energitillgänglighet*, dvs tillgänglig produktionskapacitet i förhållande till den teoretiskt möjliga. Denna, som de första tre åren låg mellan 35 och 54 %, steg 1975 till ca 70 % och har efter 1980, med undantag för något enstaka år, legat över 80 %. Se fig 26. Den var 1987 och 1989 så hög som 89 resp 88 %, vilket är nära det praktiskt möjliga med hänsyn till erforderlig årlig avställningstid för bränslebyte och revision.



26. Efter de första tre driftåren har stationen uppvisat mycket goda driftresultat. Energitillgängligheten har i medeltal varit över 80 %.

Säkerhetshöjande åtgärder

De övergripande förutsättningarna för konstruktionsarbetet var hög säkerhet och tillförlitlighet. Eftersom Oskarshamnsverket var det första kärnkraftverket i kommersiell skala i Sverige och samtidigt det första kraftverket av ASEA-ATOM's konstruktion fanns i detta tidiga skede ej etablerade konstruktionskriterier att tillgå i den omfattning som senare har blivit fallet. Man tvingades därför att själv välja sådana, avseende redundans, vilka felfunktioner som skall behärskas, procedurer för periodisk provning etc.

Ett exempel härpå är vad som har kommit att kallas den svenska *trettiominutersregeln*, som tillkommit för att förebygga mänskligt felhandlande. Enligt ordalydelsen i leveransavtalet för O I innebar den att "sådana manöveråtgärder, som erfordras för tryggandet av anläggningens såväl momentana som omedelbart förestående säkerhet, skall utföras med automatik. Med omedelbart förestående menas här förhållandena under 30 minuter efter en störning. Härför erforderlig utrustning och kriteriegivande organ skall hållas åtskilda från den egentliga kontrollutrustningen och skall ingå som en integrerad del i totala säkerhetssystemet".

Säkerhet är ett självklart intresse för kraftföretaget eftersom störningar och skador leder till avställningar och därmed stora kostnader för produktionsbortfall. Händelser som skulle kunna leda till omgivningskonsekvenser har som regel långt dessförinnan orsakat företaget mycket stora kostnader. Strävan att förebygga sådana händelser leder därför i praktiken till ökad omgivningssäkerhet. OKG's organisation hade från början byggts upp i syfte att uppnå en god säkerhetsstandard, kontinuerlig säkerhetsgranskning och rapportering av säkerhetsmässiga händelser. Denna rullande säkerhetsgranskning ledde successivt till ett antal korrektiva åtgärder.

Som exempel på en av de tyngre av dessa kan nämnas den ombyggnad som benämndes *projekt kabelseparering*. Under den fortsatta kärnkraftutbyggnaden i landet framkom betydligt större krav på separering av el- och kontrollutrustning än vad som förelåg under slutet av 1960-talet, bl a för att få ett bättre brandskydd av passiv karaktär. Man bestämde sig därför för att genom ombyggnad få upp O I till modern standard. Detta innebar att all säkerhetsmässig utrustning som krävdes driftklar i samband med stora störningar i den centrala eldelen kom att matas och styras från en separat reservkontrollbyggnad. Samtidigt härmed installerades ett nytt hjälpmatarvattensystem med kraftmatning och styrning från denna byggnad.

Denna och liknande åtgärder har medfört att Oskar I nu efter 18 års tjänst helt uppfyller de säkerhetskrav som man successivt infört för nya anläggningar. Detta bekräftas även av de utlåtanden som avgetts av Statens Kärnkraftinspektion, samt av en internationell expertgrupp i IAEA's regi som under 1989 företog en genomgripande genomgång av anläggningen.

Teknisk livslängd

Detta leder till frågan om anläggningens tekniska livslängd. Ett generellt villkor för konstruktionsarbetet var att denna skulle vara minst 40 år. Detta innebar givetvis inte att samtliga komponenter måste ha denna livslängd, man gör en optimering av förhållandet mellan initialkostnad och kostnad för utbyte efter viss drifttid. På vissa anläggningsdelar är givetvis kravet entydigt, exempelvis för byggnadsstommen och däri fast inmonterade installationer, dvs delar som kan utformas motståndskraftiga mot åldring och förslitning. Detsamma gäller de delar av primärsystemet som är så placerade eller utformade att de skulle bli mycket kostsamma att utbyta bl a på grund av att de blivit starkt aktiverade under bestrålning.

Den viktigaste enskilda komponenten är här *reaktortanken*. Hänsyn togs sålunda till det antal lastväxlingar vid start och avställning som tanken skulle utsättas för under livstiden, tilltaget med stor marginal. Detta bestämmer risken för sprickbildning på grund av utmattning. En omständighet som skiljer reaktortankar från vanliga tryckkärl är försprödning genom neutronbestrålning, vilket ger sig till känna genom höjning av omslagstemperaturen. Då tanken för O I tillverkades var man på det klara med detta, men man kände inte till den inverkan som vissa föroreningar i stålet hade, speciellt gäller detta koppar och fosfor. Man vinnlade sig därför inte speciellt om att få ned halterna av dessa element så långt som möjligt, vilket skett med senare tillverkade tankar. Detta har lett till att höjningen av omslagstemperaturen efter bestrålning skett fortare än vad som är fallet i dessa. Detta har man kunnat konstatera vid uttagning 1980 och 1985 av på förhand internt anbringade provstavar. Dessa har placerats så att de erhåller ca fem gånger högre stråldos än tankväggen, varigenom man erhåller en stor tidsmässig framförhållning. Lyckligtvis hade man från början överskattat den totala integrerade stråldosen till tanken, varför allt tyder på att några driftsbegränsningar på grund av den förhöjda omslagstemperaturen ej skulle vara aktuella efter 40 år. Huruvida några åtgärder behöver vidtagas i framtiden kommer att visa sig vid nästa provstavsundersökning 1995.

Utan att ge sig in på några spekulationer över vad som kommer att hända år 2010 då Oskar I närmar sig 40-årsdagen kan man i alla fall konstatera att det sannolikt kommer att visa sig vara en mycket god investering att via komponentbyten och ombyggnader förlänga anläggningens livslängd ytterligare ett eller annat decennium. Det är vad man just nu har under omprövning i USA.[13] Ökad livslängd av reaktortanken kan uppnås genom att neutrondosen minskas, exempelvis genom att borttagning av bränsle från härdens periferi, eller genom värmebehandling av tryckkärlet. Man bör ej heller utesluta möjligheten av tankbyte, även om detta skulle innebära avställning i kanske ett par år, men då fördelaktigast i kombination med en effekthöjning genom ny turbingeneratorinstallation.

Avslutande kommentarer

Må det tillåtas för en som var med när det begav sig att uttrycka sin glädje och tillfredsställelse över att ha fått deltaga i det teknologiska äventyr som tillkomsten av Oskarshamnsverket innebar. I sin bok "The Existential Pleasures of Engineering" jämför Samuel C Florman[14] ett stort ingenjörsprojekt med uppsättningen av ett nytt operaverk vid en av de stora scenerna i världen. Det kräver insatser av människor med olika kunnande och specialiteter, kräver mycket tid och arbete, kräver skicklighet och organisation. Men i det magiska ögonblick då ridån går upp visar sig resultatet av allas arbete, och alla erfar tillfredsställelsen och lyckan av att ha medverkat till det.

I sitt tal vid invigningen av Oskarshamnsverket sade Konung Gustaf VI Adolf bl a följande:

"Kärnkraften är ett bevis på människans möjlighet att vidareutveckla sin omvärd. I ett allt snabbare tempo har den kommit att framstå som räddningen ur en befarad energikris. I en tid då vattenkraftepoken börjar närma sig sitt slut och man skönjer svårigheter ifråga om de fossila bränsletillgångarna har kärnkraften kunnat realiseras. Sveriges första kommersiella kraftaggregat inleder således en ny epok i vårt lands kraftförsörjning. Färdigställandet av detta kärnkraftverk kan därför sägas markera en milstolpe i vårt lands industriella utveckling. Svensk industri har genom framsynthet och skicklighet självständigt utvecklat den teknologi vars tillämpning vi idag bevittnar. Oskarshamnsverket kan betecknas som en teknisk bedrift som väl mäter sig med de stora innovationerna i den svenska industrin."

Så såg man år 1972 på den svenska kärnkraften. Erfarenheterna av denna sedan dess bekräftar att vad som då sades har sin giltighet även idag. Låt oss hoppas att den tillgång som denna teknologi utgör för vårt land inte kommer att förspillas.

Noter

1. Sigvard Eklund, "Några erinringar från utvecklingen av atomenergi i Sverige", seminarium Instit. för Strålningsvetenskap, Uppsala, aug 1989.
2. K E Larsson, "Kärnkraftens historia i Sverige", Kosmos 1987.
3. Harry Brynielsson, "Utvecklingen av svenska tungvattenreaktorer 1950–70", Dædalus 1989/90.
4. Bertrand Goldschmidt, "Le Complexe Atomique: Histoire politique de l'énergie nucléaire", Paris 1980.
5. Se bl a Olle Gimstedt, "Den fredliga atomen", i skriften Personligt Präglat, utgiven 1985 till Sv Kraftverksföreningens 75-årsjubileum.
6. Olle Gimstedt, "Från atom till kärnkraft", förlag OKG AB, 1985.
7. Det är av intresse att notera att General Electric nu presenterar ett reaktorprojekt, SBWR, om 600 MW el med naturlig cirkulation. Denna anläggning är av typen passivt säker och skall med stöd av federala medel detaljprojekteras med sikte på typgodkännande av Nuclear Regulatory Commission. Se McCandless & Redding, "Simplicity: the key to improved safety, performance and economics", Nuclear Engineering International, November 1989.
8. Leine & Tenerz, "Research and development work leading up to the ASEA-ATOM BWR", Nuclear Engineering International, December 1970.
9. Cnut Sundqvist, "Värmetekniska grunder", AKK seminarium i kärnkraftteknik, aug 1967.

10. Almgren & al, "Fuel and fuel cycle for Oskarshamn", Nuclear Engineering International, December 1970.
11. Lautzenheiser & Sandberg, "Periodic Inspection Plan for the Oskarshamnsverket Reactor Pressure Vessel", San Antonio, Texas, 1969.
12. Gimstedt–Rydell–Hilding, "Oskarshamnsverket i drift", Sv Kraftverksföreningens Publikationer, Nr 554, 1972:6.
13. Thomas E Murley, "Kärnkraftsäkerhet i USA", US Nuclear Regulatory Commission; SKI-konferensen om kärnkraftsäkerhet i utveckling, Stockholm 15 nov 1989.
14. Samuel C Florman, "The Existential Pleasures of Engineering", .St Martin's Press, New York, 1976.

Oskarshamn Nuclear Power Plant Unit No. 1; A pioneering achievement in Swedish nuclear power development

Summary

In Sweden nuclear energy development work had originally been concentrated upon natural uranium, heavy water moderated reactors. When the "Atoms for Peace"-program, initiated by the US, opened the possibility of procuring enriched uranium through toll enrichment, the electric power utilities opted for lightwater reactors of the types BWR and PWR. OKG, a company jointly owned by private and municipal utilities, had at an early stage planned to enter the field of nuclear power generation by building and operating a BWR plant of intermediate size, 50–60 MW, as a first step. A construction permit had been obtained in 1960 for a site near Oskarshamn. After the break-through in the US for commercially competitive nuclear power in 1963/64 through General Electric's Oyster Creek projekt for the utility Jersey Central, OGK decided to go directly for a project in the 400 MW size range.

Based on the information available from the USAEC reactor development program, as well as on the experience gained through the work with Swedish heavywater reactors projects, the generation equipment manufacturer ASEA elaborated its own design of a 400 MW boiling water reactor, which was offered to OKG.

The first Oskarshamn unit was ordered in 1965 and was commissioned in February 1972. It has now, in 1990, been in operation for more than 18 years. Its accumulated electricity generation exceeds 50 TWh. During the last fifteen years of regular operation its overall availability factor in respect of electricity generation has exceeded 80 per cent. Besides being the first in a series of a technically successful reactors, Oskarshamn No 1 has also proved to be a reliable power generating unit. This has led to further ordering of ASEA's boiling water reactors, both by OKG and by other Swedish and Finnish utilities.

Electric power supply in Sweden is now more or less equally based on hydropower and nuclear power, which together account for 95 per cent of total electricity generation in the country. Of the nuclear portion, 80 per cent is being generated in stations equipped with boiling water reactors (BWR) of Swedish design.