
火力・原子力発電特集

火力・原子力発電機器の動向.....	55
超臨界圧貫流ボイラプラント.....	61
蒸気タービン長翼の振動と効率.....	69
原子力タービン設計上の問題点.....	76
火力発電所の自動起動装置.....	83
大形沸騰水原子力発電所制御系の特性解析.....	88

火力・原子力発電機器の動向

Recent Trends in Thermal and Nuclear Power Plant Equipment

柴田 万寿太郎*
Masutarô Shibata

要 旨

わが国で原子力平和利用の開発に着手したのは約10年前で、この間に研究炉の開発が行われ、動力用実験炉も運転にはいり、原電1号炉も本年6月には運転にはいる情勢にあり、ひきつづき原電2号炉、東京電力株式会社大熊発電所、関西電力株式会社美浜発電所などの建設が計画されており、その発電量は急速な増加を見せようとしている。

一方火力発電設備としては単機容量の増大に見るべきものがあり、アメリカにおいては900 MWの火力発電所が試運転にはいっており、また超臨界圧火力発電所の採用が普遍化しつつある。蒸気温度は過熱器出口で1,000°F、圧力は3,600~3,800 psig程度が採用されており、わが国でも各所に建設されようとしている。

以下、これら機器の一般的動向を述べるとともに日立製作所における態勢と経験を述べおおかたの参考の資としたい。

1. 緒 言

原子力発電が火力発電に匹敵できるようになる時代が、今から10年前に予想されたよりその実現が遅れていたのは、一方に化石燃料の世界的な値下がり、他方には火力発電技術の目ざましい発展が原因であった。

火力発電技術の向上は単機容量の増大と、使用蒸気圧力の上昇によって燃料消費率を年ごとに低下させ、10年前に運転されていた最大容量機は250 MW程度であったが、今年は、900 MW機が運転にはいる。また使用蒸気圧力は遂に臨界圧力を越えて、3,500 psig または、それ以上になり、1964年ころから超臨界圧時代にはいった感がある。

一方、原子力発電は、新しい分野であるにふさわしく、年ごとに技術革新が現われ、発電効率の向上と発電設備の価格の低下が効力を発して、原子力発電によるkWh電力単価は火力発電のそれに比較してほぼ同じである計画がここ一、二年次々に発表されている。

わが国における超臨界圧火力プラントは、東京電力株式会社姉ヶ崎600 MW、関西電力株式会社姫路450 MWがいずれも昭和42年に運転にはいると報ぜられている。

原子力発電の原電1号炉は本年6月運転にはいるが、これはガス冷却形で、この発電所の発生電気は通常の火力発電によるkWhコストよりかなり割高なものになる予想が発表されているが、原電2号炉である敦賀発電所、東京電力株式会社の大熊原子力発電所、関西電力株式会社の美浜原子力発電所の計画は今年から着工され、昭和44年と45年に運転開始が予告されているが、これらの軽水形原子発電所からの発電単価は現在の火力発電所の発電単価とほぼ同じにまで進歩を遂げたものである。

2. 原子力発電

わが国における原子力発電の必要度は、アメリカや欧州諸国よりも強い。その理由は、わが国の発電計画の長期見通しからいって、化石燃料を使う火力発電所の建設は、輸入しなければならない油の量から見て、ある限度がくることは必至であり、将来遅くとも昭和60年ころからは原子力発電所の建設計画を火力発電所よりも多くして、エネルギー源を核燃料に求めなければならなくなる。表1は日本原子力産業会議の開発計画委員会で発表した、昭和75年までの長期見通しである。

表に見られるように、水力の開発計画は一般水力より揚水水力に

* 日立製作所電機事業部

表1 わが国における発電開発計画
(原子力産業会議発表)

区 分	期 間 単 位	40 ~ 50 年 度		51 ~ 60 年 度		61 ~ 75 年 度	
		MW	%	MW	%	MW	%
一 般 水 力		3,142	6.8	3,633	4.6	5,780	3.0
揚 水		5,340	11.5	5,894	7.5	36,930	19.0
火 力		33,112	71.3	31,312	39.8	30,040	15.4
原 子 力		4,841	10.4	37,919	48.2	121,690	62.6
合 計		46,435	100	78,757	100	194,440	100

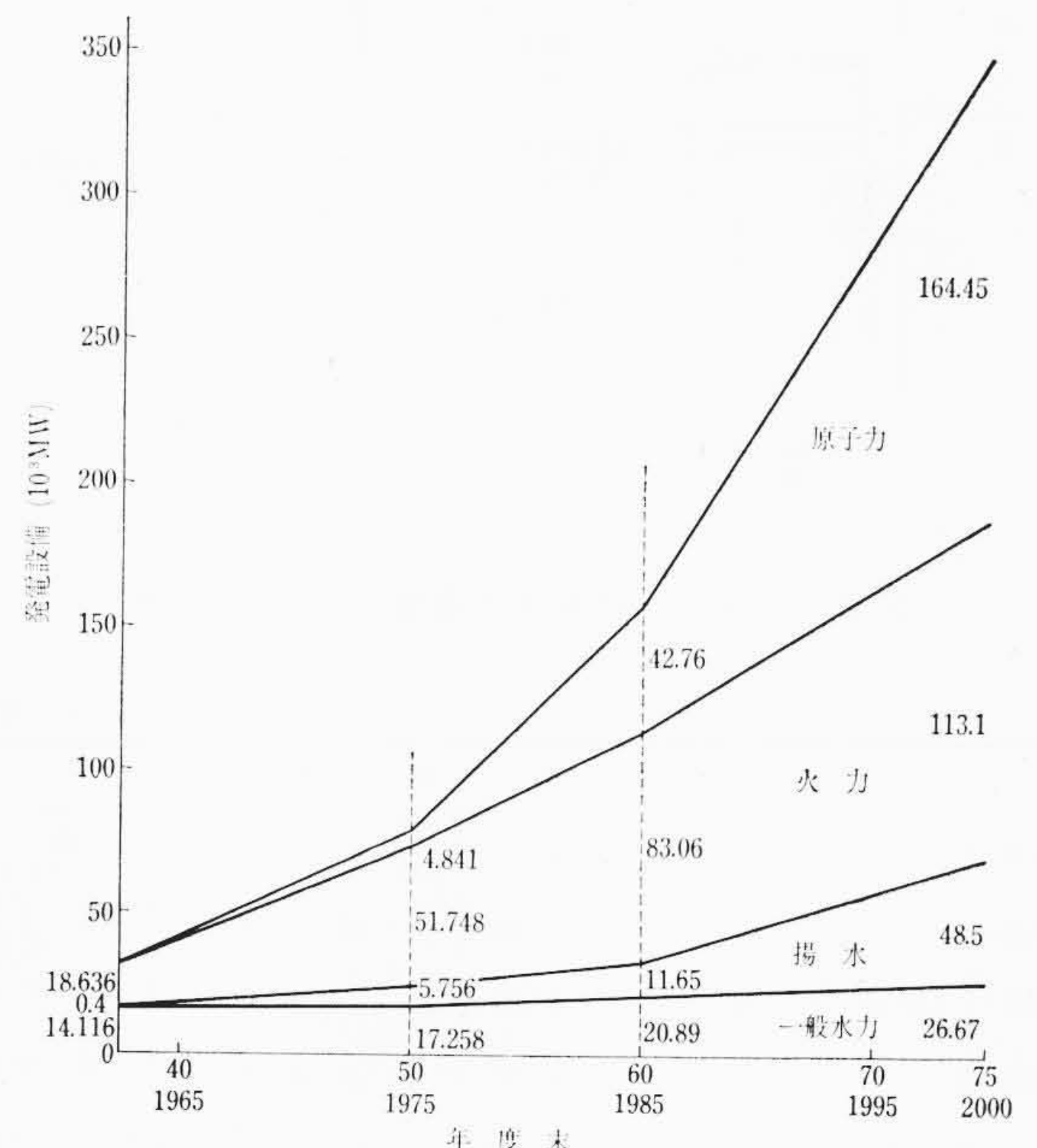


図1 わが国における発電設備容量(予想)(原子力産業会議発表)

移行して行くが、予想開発量の絶対値は昭和51~60年度で7.5%に過ぎず、一方火力発電所は、51~60年度は全開発量の約40%であるが、昭和61~75年度には全開発量の15.4%に低下する。

原子力発電所の開発計画は昭和51~60年度は全開発量の約48%であるが、昭和61~75年度には全開発量の62.6%と予想されている。

絶対量を採上げて見ると、火力発電所は昭和40~50年の10年間と昭和51~60年の10年間と、次の昭和61~75年の15年間はほぼ同量で約30,000 MWであるが、原子力発電所は、4,800, 38,000,

122,000 MW と 8 倍，3 倍となっている。

図1はこの表に基づいて、各年度における保有発電設備を示したものである。1985年(昭和60年)年度末における設置発電設備の予想は、火力83,060 MWで52%，原子力42,760 MWで27%となっている。比較のためアメリカにおける予想を図2に示す。図2はアメリカF.P.Cによるものである。1980年におけるアメリカの設置容量の予想は、火力353,000 MWで67.3%，原子力69,600 MWで13.3%となっている。

わが国が原子力平和利用の開発に着手したのは約10年前で、この間に原子力研究所を主体にした研究炉の開発が行なわれ、動力用実験炉としては、12.5 MWのBWR形炉が昭和38年秋運転にはいっている。

商用大形炉は原電1号炉として東海村に設置されたイギリスコールダーホール形天然ウランガス冷却炉166 MWで、本年6月には営業運転にはいる。これに引続いて原電2号炉325 MWが敦賀にBWR形で採用され、昭和44年に運転にはいる予定で建設に着手された。これに引続いて東京電力株式会社が福島県大熊発電所に400 MWを、関西電力株式会社が福井県美浜発電所に325 MWを計画し、い

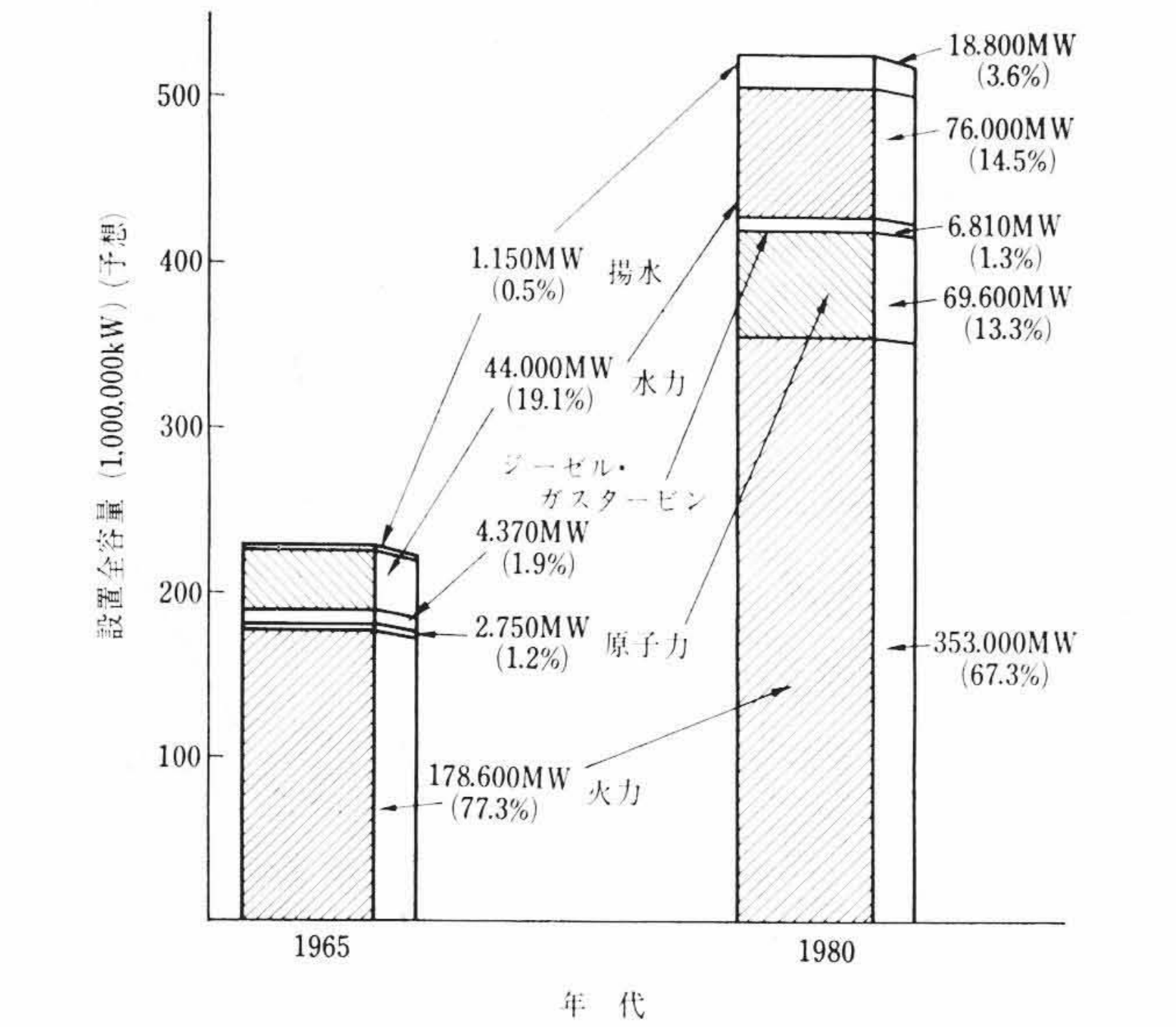


図2 アメリカにおける発電設備容量(予想)

ずれも軽水形で、昭和45年には運転にはいるよう計画されている。

これらの原子力発電所を含めて、昭和40～51年の間の設置計画を図3に示す。今日の状態においてははまだ、原子力か火力が明確でない地点もあり、これらは図の中にその旨が記入されている。

この図に見られるように、原子力発電所の単機ユニットの大きさは200 MW台のものはわずか2、3台であって、300 MW台あるいは500 MW以上のものになっている。

日立製作所は昭和31年以来原子力平和利用の開発に毎年多額の研究開発費を注ぎこみ、優秀な人材を投じて原子力科学者と原子力技術者の養成につとめてきたが、現在わが国に設置された原子炉と計画の明確化した原子力発電所14個所のうち9個所の原子炉に対

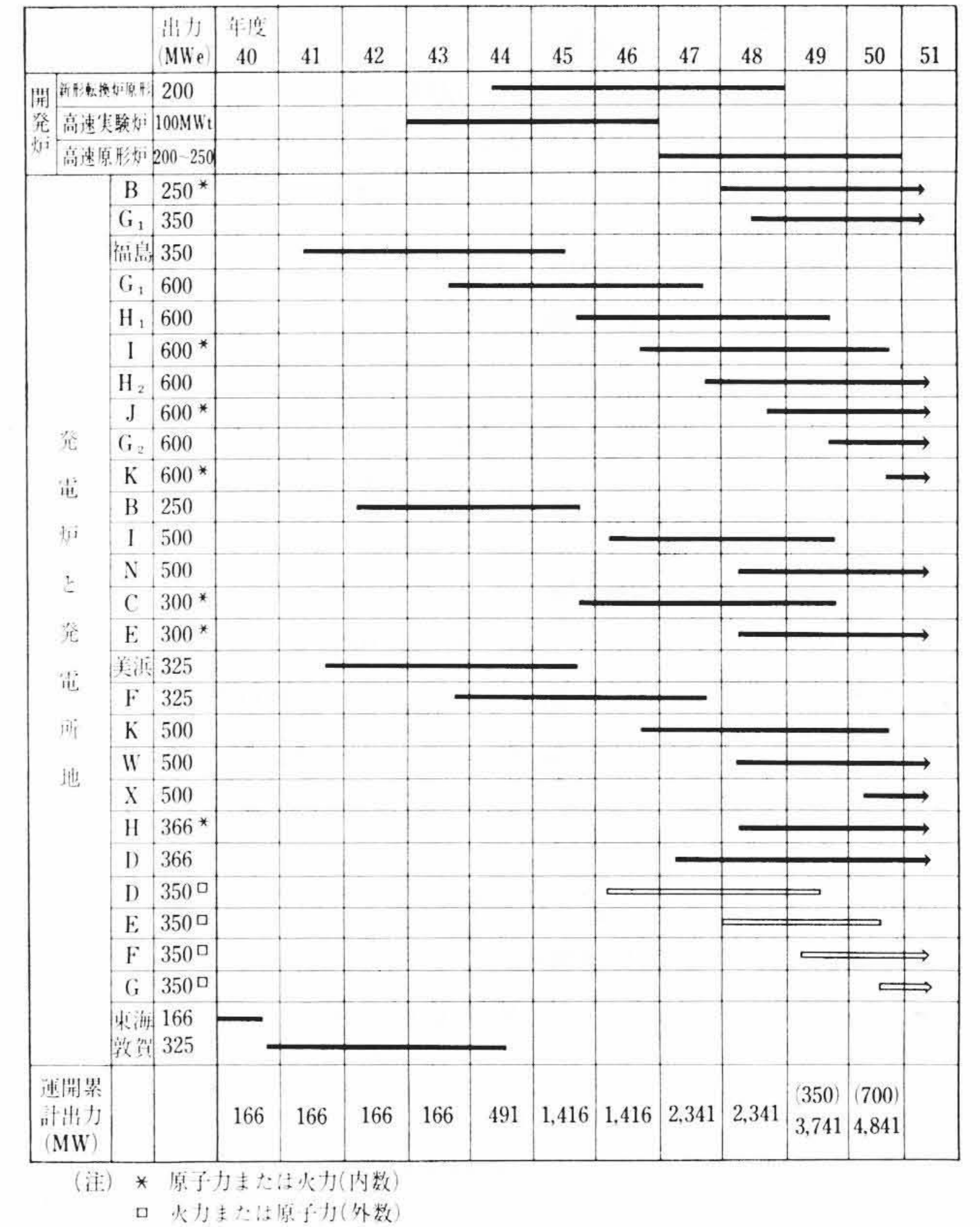


図3 わが国の昭和40～51年原子力発電計画

表2 わが国の原子炉と日立製作所の役割				
名 称	所 有 者	形 式	熱 出 力 (kW)	日 立 製 作 所 の 役 割
JRR-1	日本原子力研究所	濃 縮 ウ ラ ン (ウォータボイラ)	50	据 付
JRR-2	日本原子力研究所	濃 縮 ウ ラ ン (CP-5形) 重 水	10,000	
JRR-3 (国産一号炉)	日本原子力研究所	天 然 ウ ラ ン 重 水	10,000	原子炉本体、燃料交換機
JRR-4	日本原子力研究所	濃 縮 ウ ラ ン 軽 水 (スウィミング・プール)	1,000 (最大 3,000)	原 子 炉 設 備 一 式
立 教 研 究 炉	立 教 大 学	濃縮ウラン水素化ジルコニウム (TRIGA-II)	100	
武 蔵 工 大 研 究 炉		濃縮ウラン水素化ジルコニウム (TRIGA-II)	100	原子炉施設全般に関する技術援助 炉心タンク、水冷却系などの製作
近 大 研 究 炉	近 畿 大 学	濃 縮 ウ ラ ン 軽 水 (UTR形)	0.1W	
TAIC 研 究 炉 (HTR)	東京原子力産業研究所	濃 縮 ウ ラ ン 軽 水 (タンク式プール形)	100	原 子 炉 設 備 一 式
東 芝 研 究 炉	東 芝	濃 縮 ウ ラ ン 軽 水 (スウィミング・プール形)	100	
京 大 研 究 炉	京 都 大 学	濃 縮 ウ ラ ン 軽 水 (タンク形)	1,000	炉心タンク、同内部構造物、制御棒 名称実験用照射設備
JMTR	日本原子力研究所	濃 縮 ウ ラ ン 軽 水 (タンク形)	50,000	炉心構造物、計測制御装置 (制御棒および駆動機構、プロセス計装)
JPDR	日本原子力研究所	濃 縮 ウ ラ ン 軽 水 (BWR)	46,700 (電 12,500)	原子炉压力容器、タービン補機 廃棄物処理系機器
原 電 一 号 炉	日本原子力発電	天 然 ウ ラ ン (コールダー改良形) 黒 鉛	585,000 (電 166,000)	
原 電 二 号 炉	日本原子力発電	濃 縮 ウ ラ ン 軽 水 (BWR)	967,100 (電 325,000)	原子炉压力容器、原子炉系補機、配管配線工事、 廃棄物処理系機器

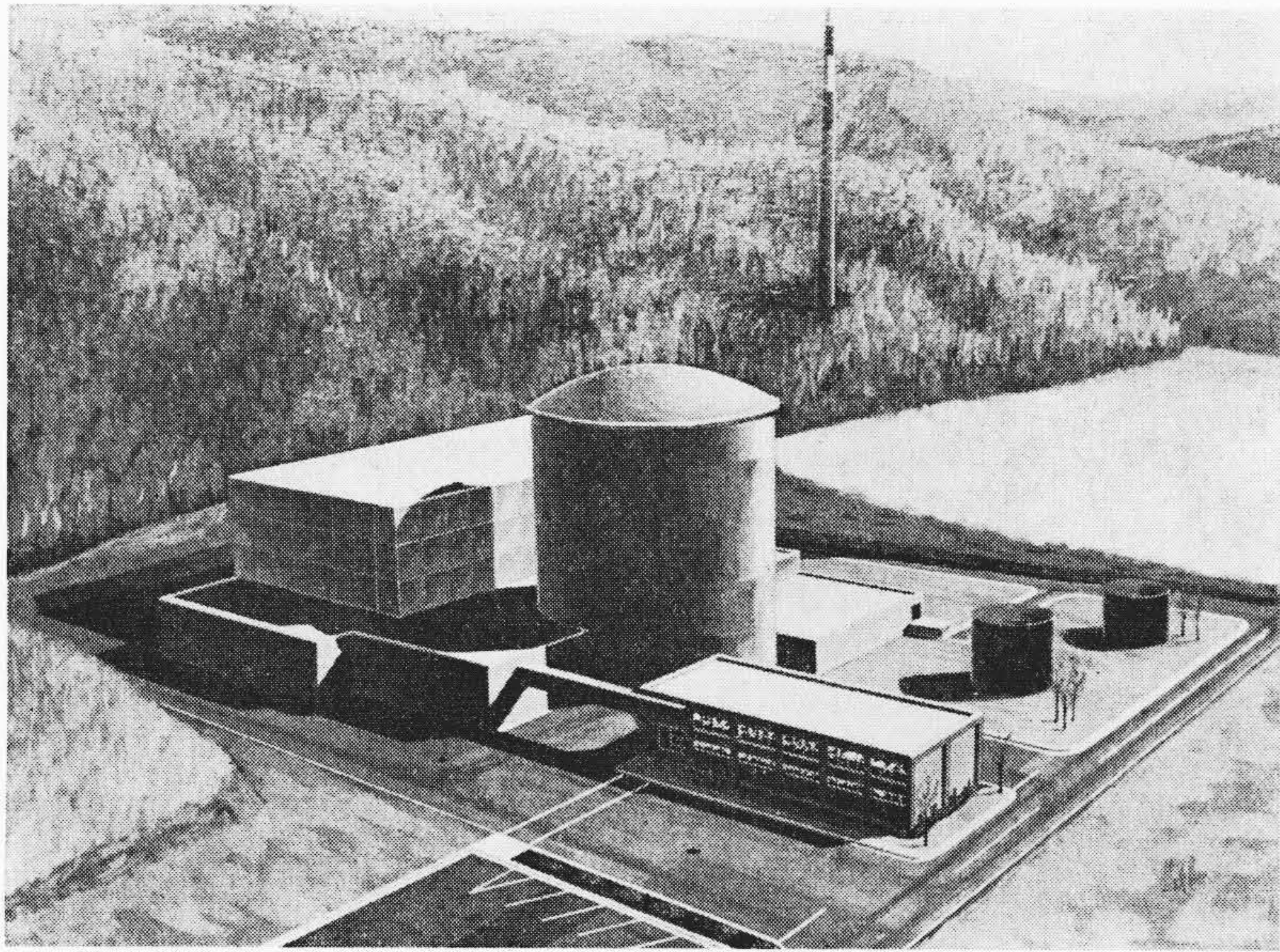


図4 原電敦賀原子力発電所

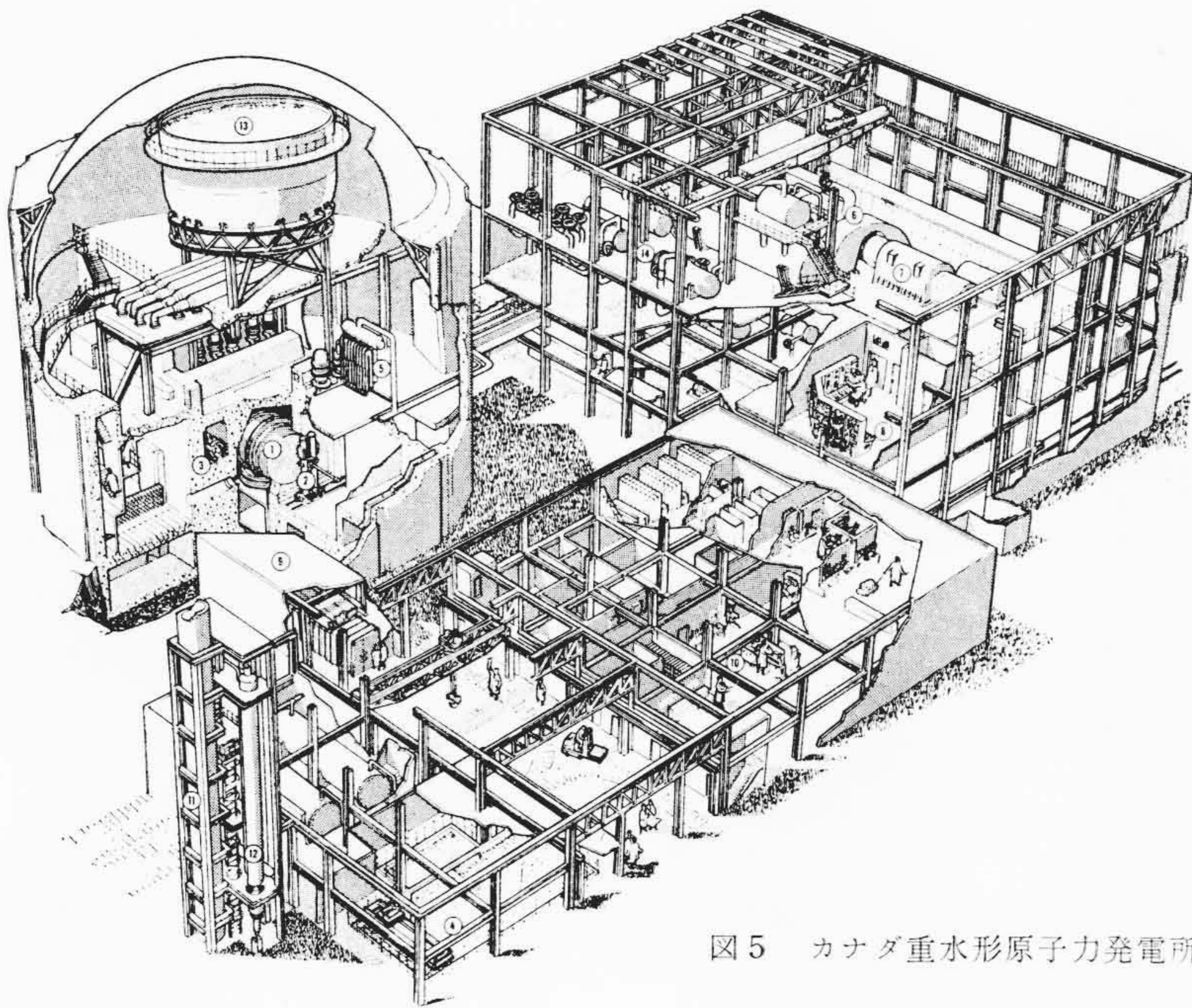


図5 カナダ重水形原子力発電所

表3 原子力発電所の蒸気圧力温度

国名	発電所	出力 (MW)	蒸気圧力 (kg/cm ²)	温度 (°C)
日本	JAPC-2	325	71.4	285
イギリス	DUNGENESS-B	598	162	565
アメリカ	GE. MSSR-300		98.7	510
ソ連	BELOYARSK	100	90	500

してなんらかの形でその建設に参加している。

表2はわが国の原子炉と日立製作所の果たした役割を示している。このうち、原子力研究所のJRR-3は昭和37年に臨界にはいったわが国の国産第1号で、日立製作所は原子炉本体の設計と製作を受持った。同じく原子力研究所のJRR-4は、昭和40年に臨界にはいったが、これは炉いっさいを日立製作所が設計製作して納入したものである。

わが国で最初に働き出した国産民間炉はTAIC研究所のHTR炉で、日立製作所が完成したものであって、昭和36年に臨界に達している。この炉の設計と性能のユニークさはアメリカにおける世界研究炉大会において高く評価されたものである。

このほか、関西における実験炉として研究に威力を発揮している京大研究炉はアメリカのインターニュークレア社の基本設計によって日立製作所が設計製作と建設を行なったものであり、また現在建設が進行中のわが国の代表的材料実験炉である日本原子力研究所のJMTR炉心の設計と計測制御装置の大部分を担当して取りまとめている。

これらの実験炉の設計と建設の経験を積むことによって、動力炉の設計と建設への基礎固めを行なってきたものであり、上の事実は現在わが国の持つ原子炉主任技術者（国家試験）146名のうち民間会社としては最多数の30名を持っていることに示されている。

わが国における動力炉は昭和34年に日本原子力研究所のJPDRが濃縮ウラン軽水形を採用して建設に着手して昭和38年10月にわが国初めての原子力発電による灯がともったのであったが、この実験用原子炉はアメリカのGE社が主契約者となり、日立製作所は東京芝浦電気株式会社とともに国内における協力者として、その機器の製作と建設作業の取りまとめを行なったものである。

現在進行中の原電2号炉の敦賀発電所もBWR形が採用されて、GEが主契約者となったが、これの建設に対しても、日立製作所はJPDRとほぼ同様の形で協力者としてこの発電所の建設に従事している。図3に示した昭和40～51年の原子力発電所建設計画においては、一日も早くわれわれ日本のメーカーが主契約者となって発電所の建設を行なうことが必要であり、このためには上に述べた発電所建設の経験が大いに役だつものである。

図4は原電敦賀325MW BWR形原子力発電所である。

原子力発電所の技術的問題の最も大きい課題の一つに原子炉から発生する蒸気圧力と温度がある。

原子炉から発生して蒸気タービンにはいる蒸気状態が、現在火力発電所プラントで採用されているように200～300 MW級のものに対しては亜臨界圧温の165 kg/cm²、540°Cであり、400～500 MW級は超臨界圧温の240 kg/cm²、565°Cであるならば、蒸気タービンは火力発電所のものと同じ設計のものが使用できる。

しかしながら、現在の原子力発電所ではいまだこのような高圧高温蒸気を使用しているところはなく、したがって原子力発電所の蒸気タービンは大形になり、タービンの蒸気の流れの中間に特殊な水分の分離装置を設けざるを得ない。200 MW以上のタービンの低圧機は1,500 rpm、あるいは1,800 rpm機が採用され、発電機もそれに従って4極機を使用せざるを得ない。

現在各国とも、原子炉から発生する蒸気の圧力温度を上昇させるための研究開発を行なっているので、軽水形炉においては核加熱の実用機への採用はここ数年中に実現されると見られている。表3は比較のために現在計画を発表したわが国の原電2号炉と比較してイギリス、アメリカ、ソ連が最近発表している過熱蒸気を採用した原子力発電所の蒸気圧力と温度を示している。

原子力発電所用タービンの設計は現在では火力発電所用タービンの設計とかなり変わったものになっている。これは従来の火力発電所タービンの技術を基礎にして低圧低温蒸気に特別な考慮を払った設計でなければならない。

日立製作所は本年始めにパキスタン国向原子力発電所のタービン発電機の受注をして、現在設計製作中である。このタービン発電機はカナダが重水炉を炉形に採用した138,600 kW原子力発電所に設置されるものであって、パキスタンのカラチ市郊外に建設され、

表 4 アメリカ 3 大ボイラメーカーの超臨界圧ボイラ受注実績

発 電 所 名	年代	発電容量 (MW)	蒸気圧力 (psig)	過熱器・再熱器 出口蒸気温度 (°F)	メーカー
Philo #6	1953	120	5,000	1,150/1,050/1,000	B&W
Eddyston #1	1954	325	5,000	1,200/1,050/1,050	C. E.
Avon #8	1955	250	3,775	1,100/1,050	C. E.
Breed #1	1956	500	3,625	1,050/1,050/1,050	B&W
Phillip Sporn #5	1956	500	4,500	1,050/1,050/1,050	B&W
Eddystone #2	1956	325	3,800	1,050/1,050/1,050	C. E.
Tanners Creek #4	1959	600	3,800	1,000/1,025/1,050	B&W
Hudson #1	1960	420	4,350	1,000/1,025/1,050	B&W
Bull Run #1	1961	900	3,650	1,000/1,000	C. E.
Chalk Point #1	1961	364	3,575	1,000/1,050/1,000	B&W
Chalk Point #2	1961	364	3,575	1,000/1,050/1,000	B&W
Sioux #1	1962	525	3,625	1,005/1,005	B&W
Sioux #2	1962	525	3,625	1,005/1,005	B&W
La Spexia #3	1962	600	3,675	1,005/1,030/1,055	B&W
Wagner #3	1962	315	3,600	1,005/1,005/1,005	B&W
La Spexia	1962	600	3,675	1,005/1,025/1,055	C. E.
Moss Landing #6 & #7	1963	750	3,600	1,005/1,005	B&W
Alamitos #5 & #6	1963	450	3,600	1,005/1,000	B&W
HAYNES #5 & #6	1963	330	3,665	1,000/1,025/1,050	B&W
BACLIFF #1 & #2	1963	460	3,650	1,005/1,005	B&W
CARDINAL #1 & #2	1963	615	3,616	1,000/1,025/1,050	B&W
Keystone #1	1963	900	3,800	1,005/1,005	C. E.
Keystone #2	1963	900	3,800	1,005/1,005	C. E.
Himeji #2	1963	450	3,625	1,005/1,030/1,055	C. E.
Bailey #8	1964	365	3,810	1,005/1,005	B&W
Anegasaki #1	1964	652	3,625	1,010/1,055	B&W
Redondo #7 & #8	1964	450	3,600	1,005/1,000	B&W
James H. Campbell	1964	375	3,600	1,005/1,005	B&W
Potamac Electric	1964	335	3,575	1,000/1,050/1,000	B&W
Allen King #2	1964	550	3,600	1,005/1,005	B&W
CANAL	1964	550	3,825	1,007/1,001/1,000	B&W
VALLEY #2	1964	550	3,600	1,005/1,005	B&W
Fort Martin #1	1964	540	3,810	1,010/1,010	C. E.
Baxter Wilson #1	1964	550	3,600	1,000/1,000	C. E.
Ritchie #2	1964	550	3,657	1,005/1,005	C. E.
Mountain Creek #8	1964	550	3,600	1,005/1,005	C. E.
W. A. Parish #4	1964	565	3,600	1,005/1,005	C. E.
Mischoud #3	1964	550	3,600	1,005/1,005	F. W.
Nine Mile Point #4	1964	550	3,600	1,005/1,005	F. W.
Harlee Branch #3	1965	480	3,625	1,000/1,000/1,000	B&W
	1965	615	3,600	1,000/1,025/1,050	B&W
Fortmartin #2	1965	600	3,810	1,010/1,010	B&W
Sibley #3	1965	350	3,810	1,005/1,005	B&W
W. H. Sammis #6	1965	600	3,675	1,005/1,005	B&W
Four Corners #4 & #5	1965	750	3,660	1,008/1,003	B&W
T V A	1965	1,130	3,650	1,003/1,003	B&W
New England P. C.	1965	630	3,800	1,005/1,030/1,055	B&W
Dayton Power & L. C.	1965	600	3,805	1,005/1,005	B&W
Brunner Island #3	1965	765	3,830	1,005/1,005	C. E.
Conemaugh #1	1965	900	3,800	1,005/1,005	C. E.
Conemaugh #2	1965	900	3,800	1,005/1,005	C. E.
Marshall #3	1965	671	3,650	1,007/1,000	C. E.
Marshall #4	1965	671	3,650	1,007/1,000	C. E.
Genoa	1965	322	3,800	1,010/1,010/1,010	C. E.
Hudson	1965	650	4,650	1,000/1,030/1,055	F. W.
Willow Glen #3	1965	550	3,875	1,000/1,000	F. W.
Bacliff #3	1965	565	3,600	1,000/1,005	F. W.

1970 年に発電の予定である。

図 5 はカナダ形重水炉原子力発電所の概観であり、日立製作所はこの発電所のタービン発電機を納入することになっている。

3. 火 力 発 電

火力発電所に超臨界圧蒸気が採用されて、その実機の建設が着工されたのはいまから 13 年前の 1953 年であって、アメリカのファイロ発電所が商用機として始めてのものであった。この機器はいわば実験的な意味も含めて、思い切って高圧高温の蒸気が採用され、容量は 120 MW でありながら、ボイラ過熱器出口の蒸気は 5,000 psig 1,150/1,050/1,000°F のもので設計されている。

このファイロの超臨界圧発電所の建設と試運転当初におけるまご

つきと対策、さらに、ファイロに引続いて着工されたエディストン 325 MW×2 基 (1954 年 56 年), エイボン 250 WM (1955 年) ブリード 500 MW, フィリップストン 500 WM (いずれも 1956 年) の超臨界圧発電所における経験は火力発電界に超臨界圧プラントがいかにむずかしいものであるかを教え、事実、これから数年は超臨界圧発電所の建設は現われていない。

上のいわば初期の超臨界圧火力発電所が実際の商用運転にはいいり、超臨界圧蒸気発電所の持つ問題点に対する対策の見通しがつき、事実火力発電所は超臨界圧蒸気を使用して経済的に有利であるとの見通しがつきはじめるにいたって、火力発電所の建設計画はようやく超臨界圧時代にはいったと見ることができる。

表 4 はアメリカの 3 大ボイラメーカーである B & W, CE, および FW が受注した超臨界圧発電所の受注年代と発電機容量, 蒸気圧力, 過熱器再熱器出口の蒸気温度を示す。

表を見てわかるように、蒸気圧力は 3,600~3,800 psig がほとんど例外なく採用され、初期のころ採用された 4,500~5,000 psig という数字は見られない。蒸気温度は過熱器出口で 1,000°F 級が絶対多く、初期のころ試みに採用された 1,100~1,200°F という数字は見当たらない。このことは、初期に採用された高圧高温より少し下がった所で一応の落ち着きを見せたことすなわちこの圧力温度が現段階では最も経済的有利であることを物語っている。

火力発電の単機ユニットは年ごとに大容量化してきていることは表 4 を見てもわかるが、図 6 はアメリカにおける過去 15 年間の火力発電単機ユニットの最大容量機のレコードと、各年に運転にはいったユニットの数の記録である。

10 年前の 1956 年には運転最大機は 260 MW であったが一昨年は 900 MW TVA Bull Run 火力発電所が試運転にはいいり、今年末には 900 MW Keystone 第 1 号機が運転にはいる予定である。

単機ユニットが大きくなるにつれて、設置される台数は減少してきている。この図はアメリカにおける 4,000 kW 以上の機器についての結果であるが、設置された数としては、1953 年, 1954 年がピークで、1958 年からは毎年少しずつ減ってきている。このことは世界的な現象でありわが国でも単機ユニットは年ごとに大きくなるが、設置台数は減少する傾向にある。

超臨界圧ボイラには Once Through 形が採用されるが、ボイラ本体の設計は図 7 の例に見られるように、ボイラの給水を温水を沸騰させるために使用される熱量の比は小さくなり、過熱器と再熱器に吸収される熱量が大きな部分を占めることになる。このことはボイラの設計に大きな変化を来す結果になる。

図 8 は世界最大のボイラである 1,130 MW 3,650 psig 1,000/1,000 °F TVA 納のものでアメリカ B & W 社が設計したものである。本機の稼働は 1969 年と予定されている。

タービン発電機は大形化になって機器効率が上昇することはもちろんであるが、機器の重量と占める面積は著しく節減される。図 9 は 900 MW を 1 基で設置した場合と、200 MW を 4 基半、125 MW を 7 基設置した場合の機器の重量比と機器の全長比を示したものである。図に見られるように、重量は約 1/2, 全長は約 40% になっている。このことは発電所建設コストの著しい改善を表わしている。

機器の形式は 450~750 MW 級まではタンデム・コムパウンド形で設計できるが、それ以上になるとクロス・コムパウンド形になってくる。図 10 は今年はじめ営業運転にはいった TVA Bull-Run 火力発電所の 900 MW クロス・コムパウンド 3,600/1,800 rpm タービン発電機の断面図である。

超臨界圧火力プラントが初期のころ遭遇した問題に起動時における騒音の問題がある。エディストン発電所、エイボン発電所などにおける起動時の騒音の問題はわが国の調査団によっても持ち帰ら

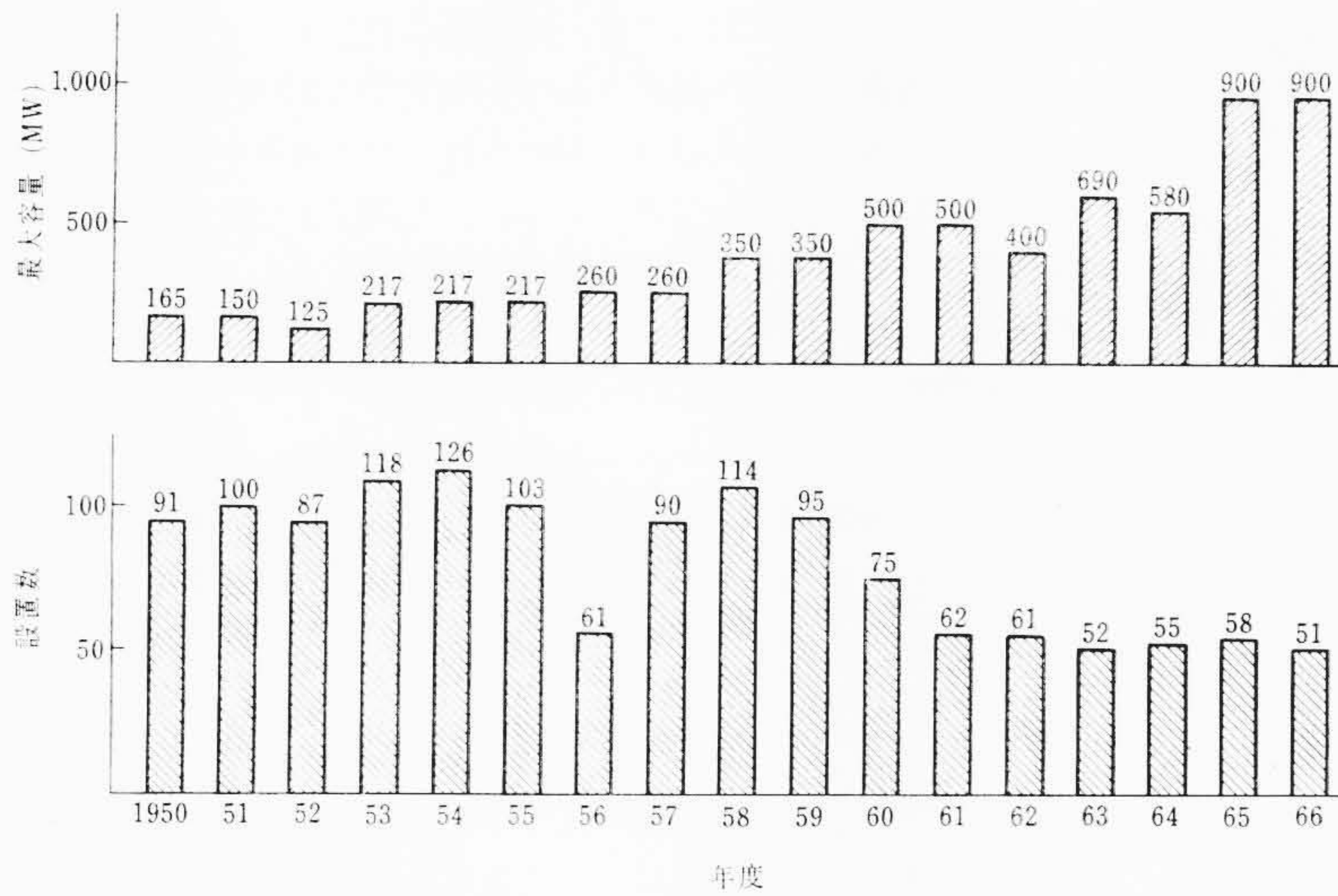


図6 アメリカにおける火力発電最大容量機記録と各年度設置台数

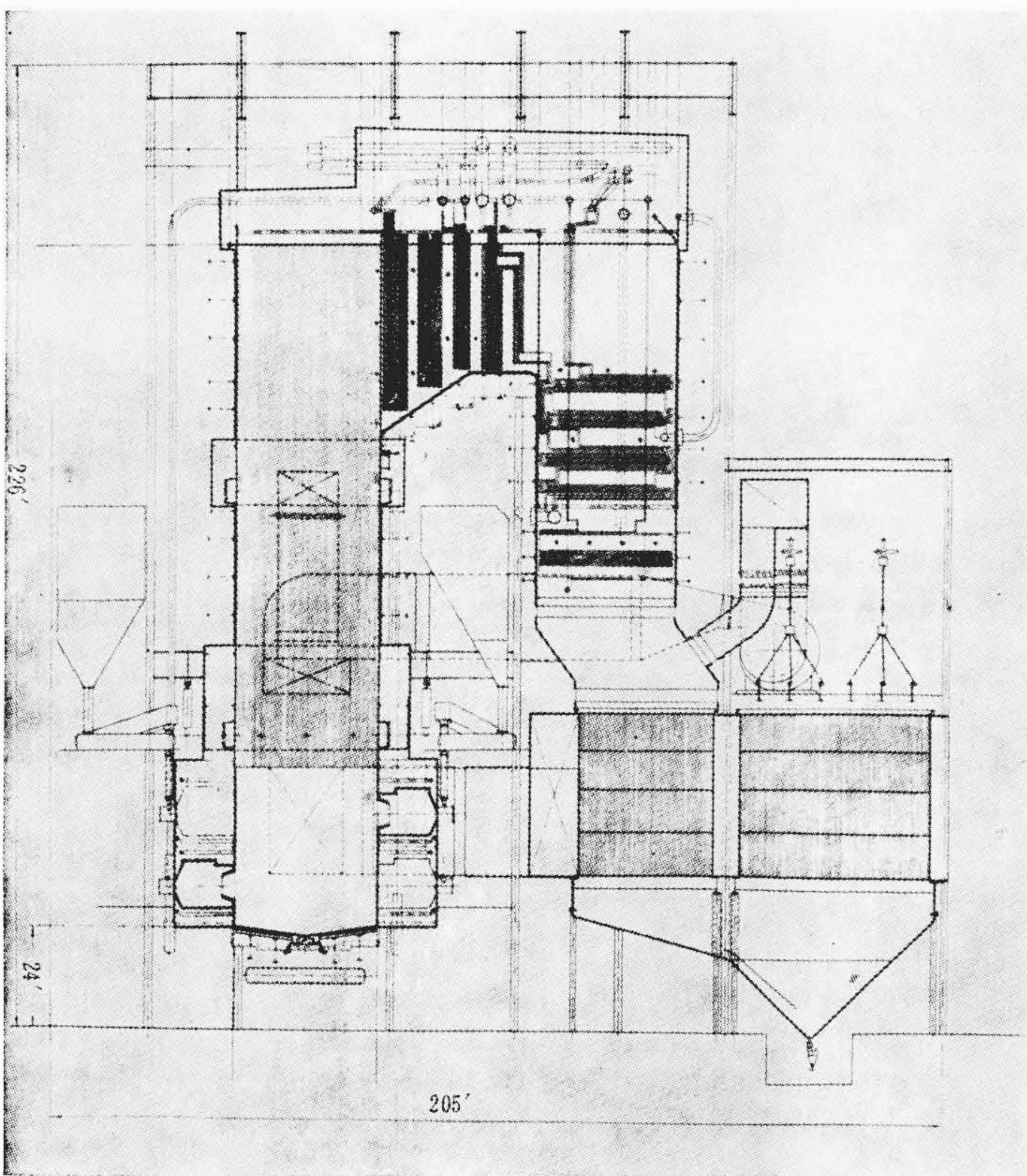


図8 1,130 MW 超臨界圧ボイラ (世界最大)

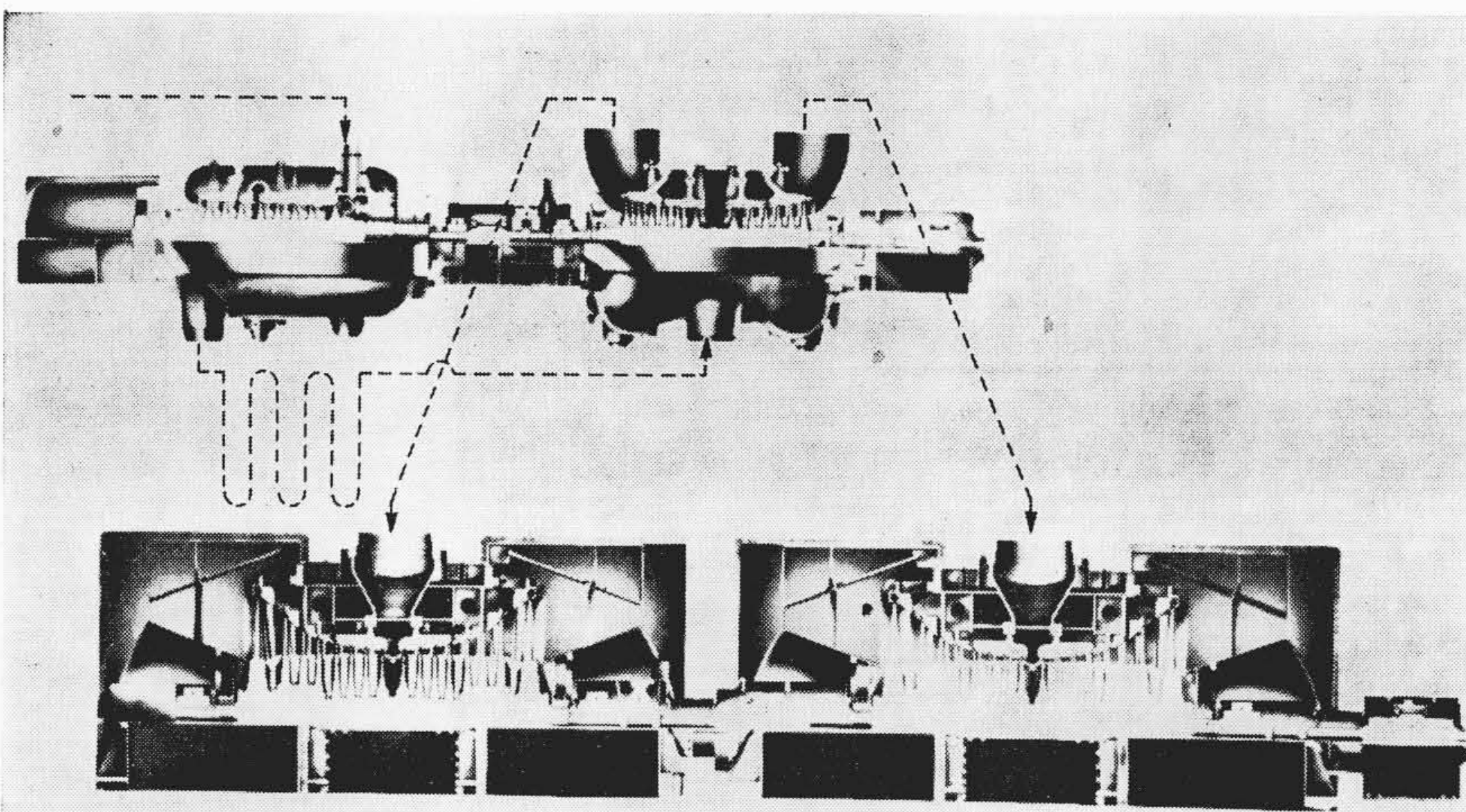


図10 900 MW, 3,600/1,800 rpm Bull-Run タービン発電機

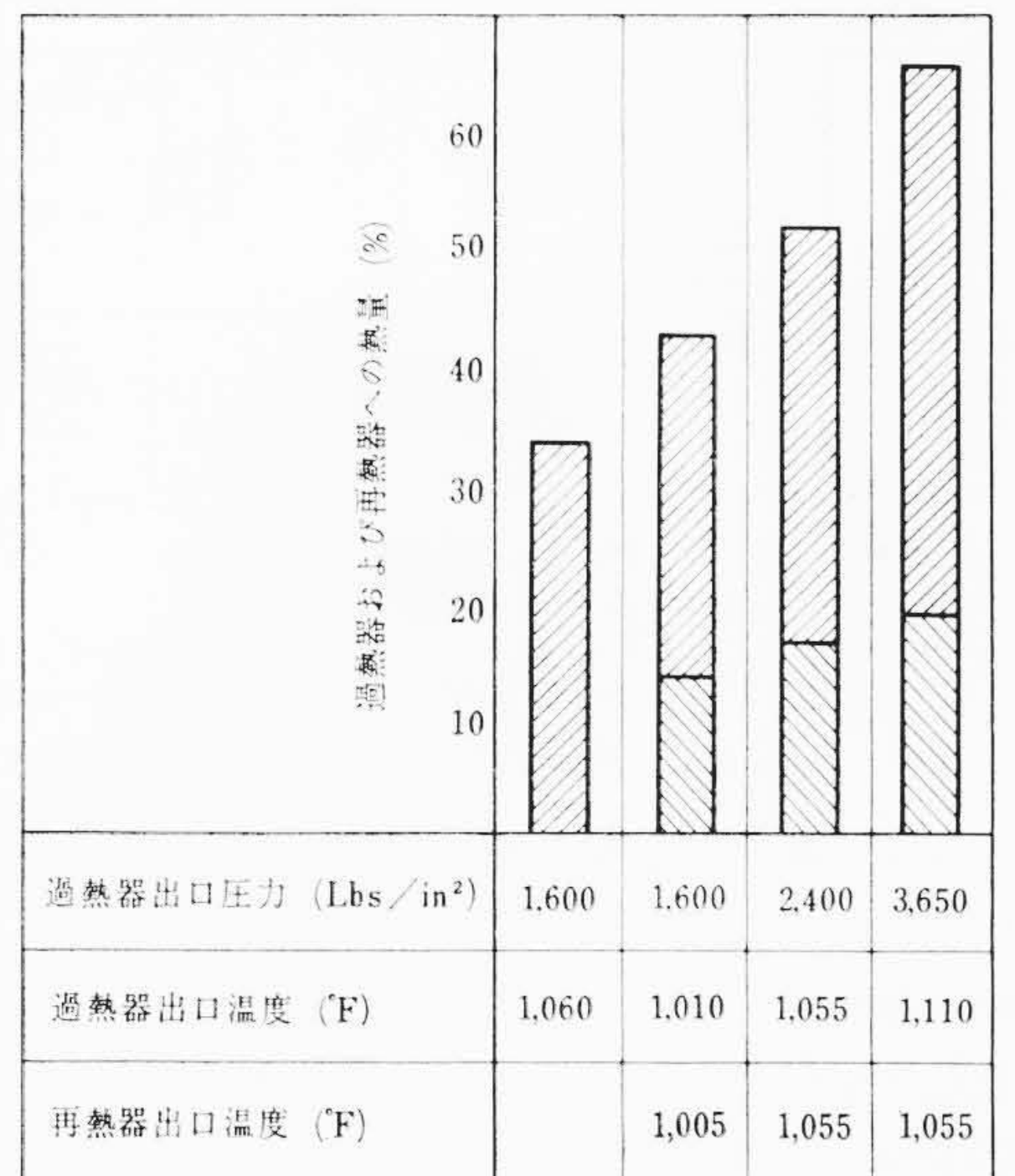


図7 蒸気状態によるボイラ内吸収熱量分布

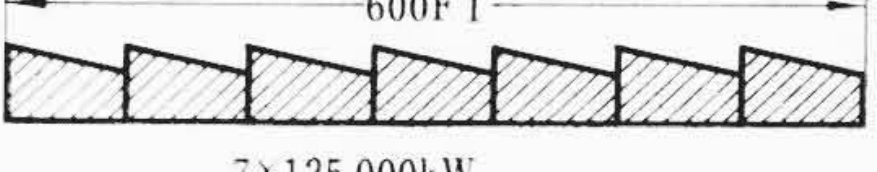
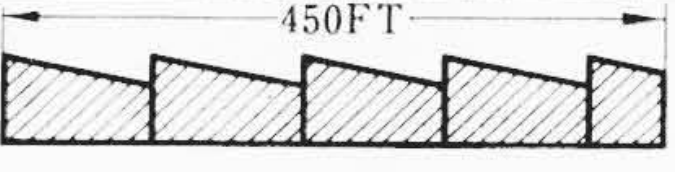
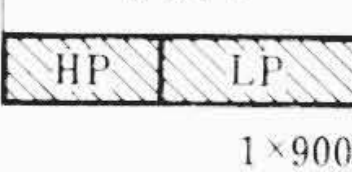
全 長	重 量
 600FT 7×125,000kW	10 ⁶ LBS 12.2
 450FT 4.5×200,000kW	7.9
 240FT HP LP 1×900,000kW	6.2

図9 900 MW タービン発電機比較

れ、このことが超臨界圧プラントに踏み切るための一つの障害となった。

超臨界圧プラントの起動時における騒音の原因は、起動の際スーパーヒータ・バイパス弁によって発生するものであるが、現在設計されるものはさらにレジスタチューブをバイパスに入れることによって解決している。この系統を示したのが図11である。

わが国の超臨界圧火力プラントは姉ヶ崎 600 MW、姫路 450 MW、知多 500 MW が着工しているが、これらはいずれもタービン発電機が輸入機であり、ボイラも前者二地点は輸入である。今後計画される超臨界圧プラントは国産を中心とすることが望まれている。

日立製作所の超臨界圧プラントに対する基礎研究は、昭和 35 年に完成したテストプラントによって開始され、ボイラの伝熱流動特性、超臨界圧プラントの起動特性と制御特性、超臨界圧蒸気下における材料の耐用試験と給水内の銅の溶解と堆積などの諸問題が研究題目として採り上げられた。

一方実機に対する経験は亜臨界圧蒸気プラントによって実績を納めてきている。すなわち、2,400 psig 亜臨界圧ボイラとしては五井 265 MW と新潟火力 250 MW ボイラが今年始めに

