

発電用ボイラ技術開発の最近の課題

大阪大学工学部 石 谷 清 幹

1. 緒 言

ボイラ技術の進歩はまことにめざましく、多彩である。大局的にみれば、主流となる発電用高温高压大容量ボイラ技術開発が、あらゆる困難を克服しつつ全世界的規模で推進され、それがやがてボイラのあらゆる部門に浸透してゆく傾向がある。しかし一口にボイラといっても、陸用あり船用あり、また最近では宇宙船や人口衛星用、またこれを打上げるロケット用まであり、高压低压大小さまざまであるから、技術開発が発電用の領域で一たんすんだとしても、それがそのまま他の領域に応用できるわけではなく、個々の部門で独自の開発努力が注入されなければ到底ものにならない。もちろんその上に個々の部門に固有の問題も加わるから、世界各地で、また日本の各地で、メーカーや研究者が追及している開発テーマは百花さきみだれる観を呈する。

その系統的な、つまり技術史的な分析は別として、その模様の大体を現象論的に概観してみよう。今回はまず電力会社や英国の電力公社のような事業用発電所で使われるボイラについてのべる。

2. 大容量化に推進される高温高压化

事業用発電の動力源としては蒸気動力が独占的に用いられている。この情勢をくずし得るような動力源としては、原理的に将来性を認められているものはあっても、いずれも実験室的規模のものばかりであって、近い将来に蒸気動力の独占体制はゆるぎそうにない。一方、電力需要は日本でも外国でも急増の一途をたどり、これをまかなうには発電所の単位も大きくならざるを得ず、タービン出力の急増傾向は今後も続くであろう。わが国でも姫路第二発電所むけ 32.5万 kW 機が昭和39年4月に、また尾鷲発電所むけ 37.5万 kW 機が同年10月に完成するが、外国では昭和39年中に 100万 kW 級のタービンは数基運転にはいり、まだまだ単位出力は上ってゆくだろう。尾鷲むけの 37.5万 kW 用ボイラは蒸発量 1,225 t/h であるが、100万 kW タービンには 3000 t/h のボイラがつくのである。

蒸気動力の特質として、ある単位出力に対して効率を最大にする最適圧力が存在し、単位出力が増せば最適圧

力は高くなる。巨大発電所の莫大な燃料費を考えると効率に対する要求はますます切実になる。高温高压化に必要な技術開発投資はたしかに巨大ではあるが、その投入を合理化する発電所の巨大化の傾向が現存するから、今後ともますます高温高压化は進行すると考えられる。これがあらゆるボイラ技術開発の中核になっているのである。

3. サイクル論からみた高压化と高温化の比較

高压化と高温化は相伴なって進行するものであって、両者ともに大切な技術開発目標であることはもちろんである。しかし両者は開発の戦略戦術において多少の差異がある。

ボイラ・タービンメーカーは、世界的にみて、ジェットエンジンやガスタービンのメーカーと兼業の場合が多く、素材メーカーにいたっては完全に一致しているといつてよいであろう。高温用材料の技術開発推進力は率直にいうと蒸気動力よりも航空宇宙用原動機であり、短寿命のこれら機器に関する材料開発が先行し、その経験を取入れて、長寿命で大形の蒸気動力用材料開発が行なわれている。これはもちろん蒸気動力の側では高温技術に無関心であつてよいというのではなく、たんに有力な先達がいることを指摘したのである一方高压線における先達としては高压化学工業があるが、高温化における航空宇宙原動機工業ほど強力ではないように思われるから、もし高压化について現時点で格段の努力が要請され、かつそれが有利であるとみるならば、蒸気動力関係者が中心に立たざるを得ぬ場合でも、関連技術分野の協力をよびかけつつ、技術開発を進めねばならない。

わが国の現代蒸気動力関係者の間には、高温高压化の必要をみとめつつも、高压化についてはやや冷淡な空気があるように見受けられる。たとえば圧力は今後当分は 250気圧までで充分であり、300気圧以上を考慮する必要がないとするような見解が多いようである。しかし筆者は、過去においても高压化よりも高温化の方が効率上有利であると表面的にはいわれながら、高压化がつねに現実化しつつ現在にいたっていることを指摘したい。そして表面的にこのような見解が有力になる理由の一つとし

て、従来のサイクル論における高圧化の効果の評価方法が関係していると考える。

4年ばかり前に、わが国で超臨界圧発電所の建設を考慮すべきかどうか議論されはじめたころ、筆者もこの問題に正面から取り組むつもりで検討をはじめ、サイクル論について一つの結論に到達した。その結果は著書⁽¹⁾、論文⁽²⁾、講演などで公表済みであるからくわしくは反復しないが、要点のみここに記して、現在においても高圧化こそ効率改善の基本線であることを強調したい。

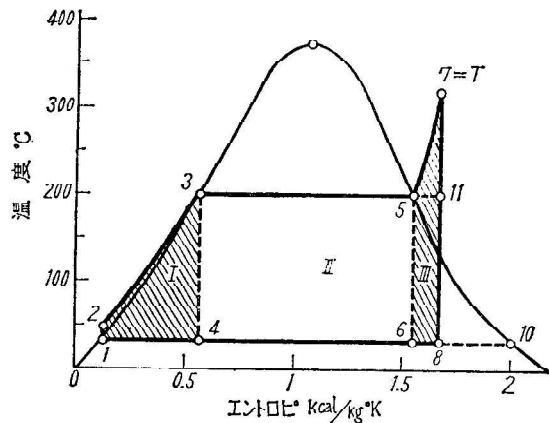


図1 無抽気単純過熱サイクル

従来のサイクル論では、温度エントロピー線図上で図1のようなサイクル、すなわち抽気を全く行なわないサイクルを基準にとり、その効率が抽気によりどう改善されるかを補正するのがつねであった。図1のサイクルではサイクル効率が図2のようになる。図によれば初圧の影響は比較的軽微であるから、たとえ再生による効率改善効果が高圧ほど大きいことを知っていたとしても、初圧の影響に関する誤解を生む根源になることは充分察せられる。しかも複雑なサイクルの現実のプラントにおいて

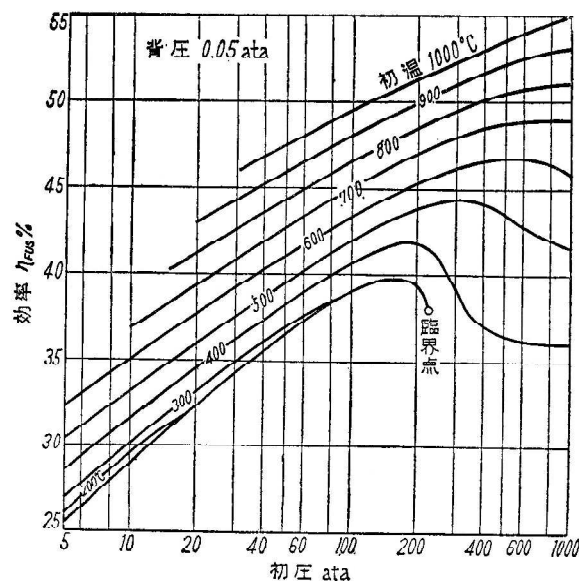


図2 前図のサイクルの熱効率ただし背圧は 0.05 ata

初圧初温をかえて初期計画をしてみると、初圧をかえてもプラント効率にはあまり関係せず、初温をかえるとプラント効率が顕著によくなるという結果が必ず出てくるから、なおさら初圧に関する誤解が意識の上につよく印象されることになる。しかし現実のプラントで初圧の影響が出ないのは、実はタービン効率が初圧をあげて悪くなることによるものであり、サイクル効率のせいではないのである。すなわち出力一定のタービンにおいては、つねにプラント効率を最大にする初圧が存在し、それ以上圧力をあげすぎるとかえって効率がわるくなるのであるが、これはタービン効率が初圧により低下することによるのであって、サイクル効率は初圧と共に上昇するのである。一方、初温については、初温があがればタービン効率もサイクル効率も共に改善される。

しかし、図1のサイクル効率が初圧と共にかはばかしくよくなるのは、実は図中の面積12341が初圧と共に増すことにあり、現実の高圧プラントのような多段抽気すると、この面積は極めて小さいのである。現実の抽気段数は6段ないし10段くらいであるが、このような多段抽気では、サイクル効率が無抽気の場合よりも無限段抽気の場合の方に極めて近くなることは常識的にも納得できるであろう。無限段抽気では面積12341は完全に廃止され、サイクルは図3中に12341といたようになる。このサイクルの効率は容易に計算できて図3の通りとなる。図2とくらべると、初圧の影響に関してうける印象が全く変わっていることを誰でも認めるであろう。現代のよう

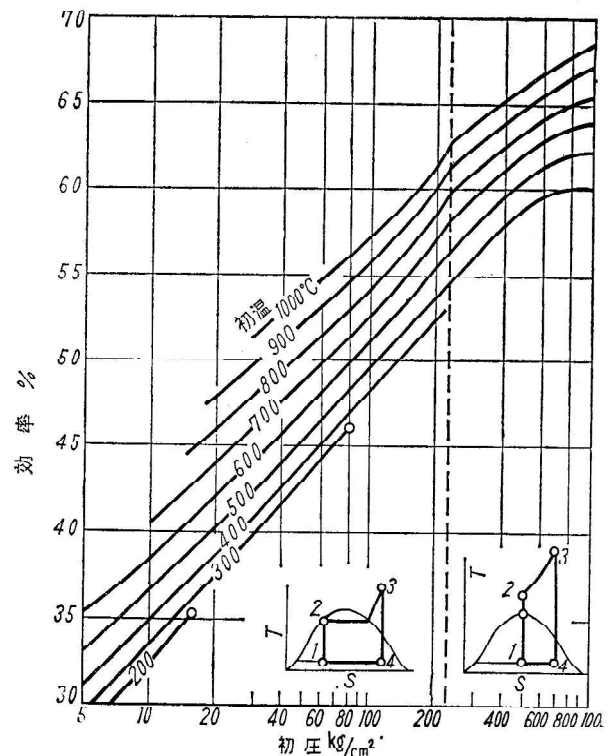


図3 無限段抽気1段過熱サイクルの熱効率

に高圧になっても、蒸気動力の効率改善の基本線は依然として高圧化であり、高温化はむしろ補助的であることになる。

しかし現実のサイクルでは既述の理由により効率を最大ならしめる最適初圧が存在する。だから、ワット以来の蒸気動力史の事実が示す通りに蒸気動力が高圧化の道をすすんできたのは、実は時代と共に蒸気機関や蒸気タービンの1台の出す馬力（筆者のいわゆる単位出力）が増してきたことに主な原因があるのである。さらに、タービンの翼列や段の技術が進歩すると、タービン自体の効率がよくなる可能性をうむが、プラント効率はタービン効率とサイクル効率の積により決定され、タービン効率にくらべてサイクル効率は半分くらいの悪い値であるから、翼列や段の技術成果をタービン効率としてそのまま使うよりも、初圧をあげて、タービン効率上は従来と大差なく、サイクル効率がよくなる方向に現実のプラントが建設され、これも初圧を上げる作用をするのである。

だから、蒸気動力の現状を分析し、技術開発の戦略目標をたてるにあたっては、初圧を独立に取上げて検討したのでは大局を誤ることになり、必ず単位出力との関連において検討せねばならないのである。

この点に着目して近い将来の圧力上昇傾向を予測するには、つぎのようにすればよいであろう。すなわち、総出力増大傾向はかなり正確に推定できるから、これに立脚して必要なタービン単位出力の増大を想定し、これに対して効率最適圧力を求めればよい。出力と効率最適圧力を求めるに当り、プラントの試設計までやってみるのであればもちろんそれにこしたことはないが、技術開発目標設定という目的に対してはこの方法は必ずしも適当ではない。それは、将来のことを考えるのであっても、話が具体的なプラント計画の形で行なわれると、どうしても現在の技術水準にこだわりがちとなるからである。それにこだわるなという逆にもあまりにも現実ばなれした想定をしてしまう傾向も生ずる。このような目的に対しては、武田康生の開発した蒸気タービンの相似理論が有力な手段となるのである。これに立脚した詳細な分析は別の機会にゆずることとしたいが、大出力化の傾向がずっと限りは高圧化が依然として技術開発の主流であることをつよく指摘しておきたい。

すなわち、もつか建設中の火力発電所の単位出力と蒸気状態との関係を表示すれば、表1のようになり、156 MW までは単位出力と共に圧力が高くなっているのに、175 MW 以上では圧力が頭打ちとなっている。いずれももつか建設中のプラントをしらべた結果であるから、この頭打ち傾向は 156 MW までの圧力が高すぎるからそ

の反省として出てきたものでないことは明白である。以上の所論から当然結論される通りに、220 MW 以上の大形機器はすでに必要に迫られて実現しているのに、これに見合う高圧技術の開発が立ちおけていることを意味するものと解釈せざるを得ないのである。換言すれば、高圧ボイラタービン技術の開発は刻下の急務である。この要求にいち早く応えた企業は、その立場が著しく有利となるだろう。

表 1 昭和38年8月1日現在建設中の火力発電所
むけ復水式蒸気タービンの単位出力と圧力温度との関係

	単位 出力 MW (1)	圧力 atg (2)	温 度 °C	仕向先発電所	備考 (2)/(1)
自 家 用	3	37	413	日本鉱業 佐賀関	12.3
	9.6	123	540	呉羽油化 錦気力	12.8
	20	100	525	川崎製鉄 千葉	5.0
	50	122	538	八幡製鉄 新洞岡	2.44
	75	113	541/541	昭和電工市原	1.51
事 業 用	75	111	543/543	堺共同火力	1.48
	125	140	541/541	江別, 新潟	1.12
	156	186	569/541	富山, 多奈川, 春日 出, 水島, 下松, 大村	1.19
	175	186	571/544	川崎, 横浜	1.06
	220	185	541/541	四日市	0.84
	220	184	570/541	新刈田, 新名古屋	〃
	250	176	571/569	新潟	0.70
	〃	186	571/543	堺港, 姫路第二	0.74
	265	176	571/569	五井	0.66
	〃	186	569/569	五井	0.70
	325	175	571/543	姫路第二	0.54
	350	188	571/568	横須賀	〃
	375	176	571/541	知多	0.47
	〃	190	571/541	尾鷲	0.51

(注1) 備考の数値はサイクル効率を除外したタービン効率と関係があることの予想されるものである。

(注2) 156 MW までは圧力が単位出力と共に増しているがそれ以上では頭打ちとなっていることをみられたい。

3. 自動化による人員削減

戦時中に当時の最新鋭発電所だった 尼崎第一 (5.3万 kW 機6台) および第二 (7.5万 kW 機4台) には各 600 人の従業員がいて、うち半数が運転員であった。尼二の場合、ボイラ9台で3直制であったから、1直100名 (ボイラ1台当りでは11名) くらいの運転員 (タービンや電気も含めて) がいたことになる。目下建設中の尼崎第三発電所は 15.6万 kW 機2基、定員115名、1直11名の4直制であるから、ほぼ同一出力の発電所を 1/10 の

運転員で、またボイラ1台当りになおしてみてもほぼ半数以下の運転員で運転することになる。タービンや電気も含めて11名の運転員で巨大なボイラ2台を含む発電所を運転するのであるから、ボイラ自体が高度に自動化されていることはもちろんであるが、あらゆる部門が自動化され、運転員相互の連絡も、いつでもどこにいても連絡できるような方法が講じられていることが察せられるであろう。さらに進んで、起動停止のみは運転員が出張して来て行なうが、常時は完全に無人の発電所を開発する目的で、実験的な無人の火力発電所も外国では建設されている。

4. ボイラにおける蒸気と水の流動と伝熱

火力発電所の構成要素のうち最も値段の高いものはボイラであるから、ボイラの値段を切下げる要求は極めてつよい。その最も直接的な方法は、ボイラを小さくつくってしかも大きな能力を発揮させることであるが、当然伝熱面積当り通過熱量を増したくなる。ことに燃焼室が巨大になるとその内部温度はたださえ過昇する傾向をもつので、燃焼室周壁に設けた放射伝熱面の熱負荷は、吸熱流体側で応じうる極限まで高めることが要求される。一方、伝熱上の特性の最も良好なのは沸騰水であるが、高圧になると、水の熱力学的性質からくる当然の帰結として、蒸発熱が減少し、内部に沸騰水を保有する蒸発伝熱面は縮小せざるを得ず、不飽和水や過熱蒸気で高熱負荷を受けを伝熱面を構成せざるを得なくなる。この矛盾を有効に解決し得たメーカが競争上有利なことはいうまでもないことである。

ことに臨界圧(225気圧)以上の高圧ボイラでは、本質的に沸騰領域がなくなってしまう。しかも水温が400°C内外のところを通過するときに伝熱上の特性が悪くなる場合がある。この解決策として、アメリカのバブコック社では、管の内面にねじのような溝を切ったものを開発し、前記の姫路第二発電所むけボイラでは、圧力はまだ181気圧の臨界圧以下ではあるが、実用されている。従来はボイラ蒸発管の外面にひれをつけたり棒をうえたりした例はあっても、内面に伝熱上の要求にこたえる目的の加工をした例はなかったのである。この技術は高圧ボイラ用の特殊技術として開発されたものではあるが、高熱負荷の要求される中低圧ボイラ、たとえば船用ボイラ(特に艦艇用ボイラ)やピーク専用ボイラなどにも応用されてよく、そのための基礎研究も要望される。

5. ピークロード発電所

ボイラもタービンも、休止時には温度一様で常温であ

るが、運転中は温度レベルが上っているのみでなく、特定の温度分布をもつ。この温度分布は負荷により、またボイラの場合には燃焼状態により変動する。すなわちボイラやタービンは運転中は静的な熱応力をうけ、発停時または負荷変動時には過渡的な熱応力をうける。すなわち静的および過渡的な熱応力は蒸気動力にとって不可避であるが、その害は厚肉の大形機ほど、また使用中の温度の高いほどはげしくなることは当然である。高温高圧大容量機の実用化に伴なって熱応力の実態を知り、かつ軽減する目的の研究や考案が増しているが、完全になくすることは原理的に不可能であって、この意味からも高温高圧大容量機はなるべく一定負荷で発停回数のすくない使いかたをすることがのぞましい。もちろん経済的理由からも高価かつ高効率の新鋭プラントはなるべく全力負荷で昼夜連続して一年中使用することがのぞましいのであるが、建設後数年もすれば、かつての最新鋭発電所も完全に基底負荷ばかりを持たせるわけにゆかなくなり、発電系統の変動負荷を受持たざるを得なくなる。しかし相当の高温高圧ボイラだからなるべく変動負荷にさらしたくないとすれば、変動負荷を吸収してくれる発電所を別に持ちたくなるのは当然である。

このような調整発電所としてはダム式水力発電所が最適と思われるが、水力の側にもいろいろ事情があるから変動負荷吸収を主目的とした火力発電所の建設が構想されるにいたった。ピークロード発電所といっても、電力系統が合体として巨大化しているために、1万kWや2万kWでは話にならず、10万kW内外のものも検討されつつある。ピークロード発電所は年間利用率が低いため、熱効率が高いことよりも建設費の安いことが重視され、取扱い簡単で馬力が出るものが必要となる。この見地からボイラをみると、従来のボイラは必ずしも適当でない点があるので、ピークロード専用発電所むけボイラの技術開発も当面の重要課題である。

現在のところでは、最も激烈な負荷変動下に使用されているボイラは、上吹き転炉用廃熱ボイラであろう。このボイラは無負荷から数分で全負荷になり、30分内外経過すると、今度はまた数分で無負荷にもどるという実にあらっぽい負荷変動をうける。これに実用されているのはほとんど独占的に強制循環ボイラであるが、この実績は充分な理由があり、尊重されてよいであろう。貫流ボイラに循環ポンプを附設して軽負荷時の特性と負荷変動への適応性を改善するところみは、船用を目的とした播磨貫流ボイラにおいて筆者と鳥田氏のころみたところ、2t/hテストボイラにおいては所期の目的を達しうることが確認されている。Sulzer貫流ボイラでも循環ポンプ併用方式が提案されているようである。ボイラ側

はこれでかなり変動負荷順応性が改善されるが、タービン側の事情もあり、本格的なピークロード発電所はやはり独自に建設されるべきである。ピークロード発電所は当然建設費が安いから、電力系統全体の投資効率からみても合理的であろう。

6. 原油なまだき

最後に、原油なまだきの問題について一言ふれておきたい。この問題は電力業界が熱心に推進し、石油業界が強硬に反対しているいわくつきの問題であって、最終的には国民経済の立場から決定さるべきものと思う。技術的にみると、ボイラにたくときの燃焼上の特性においては本質な問題は何もなく、引火点が低いことによる危険性の問題が本質的な問題であると考えらる。

重油やガソリンの貯蔵や取扱いについては消防法によるやかましい規定があるのは周知の通りである。原油はガソリンよりもさらに軽質のガスをも吸収しているから、引火点はマイナス 20°C くらいが通常の値であり、大量に貯蔵する場合、その危険性をいくら強調してもしすぎることはないであろう。僅か 5kl 入りの重油タンクの爆発でも三段抜き写真入り新聞記事になるくらいの事件である^注。新鋭火力発電所でも重油消費率は 230g/kWh くらいだから、50万 kW の発電所で10日ぶ

注。昭和38年11月14日午前10時ころ海南で 5kl 入り重油タンクが爆発し、同日付朝日新聞夕刊に三段抜き写真入りで記載された。

んの貯蔵をすれば約 3 万トンの貯油が必要で、1ヶ月ぶんになれば10万トンとなる。ポンプや配管から常時もらぬだけの対策では不十分で、万一もれても事故は絶対にくいとめ、ことに火のついた原油が海面に流れ出して文字通り火の海になるような危険は、よほど辺ぴな離れ島に設けた発電所においても、確率が極めて微少でなければならない。原油はしかし国際的な商品で、貯蔵や輸送についての経験も乏しくないから、結論の出せる可能性は充分あるように思う。その際、事故の場合に企業のこうむる経済的な危険のみでなく、まぎぞえを食う従業員や附近の住民の安全について、国民の立場に立って充分配慮されることがのぞまれる。

7. 結 語

以上論じた点以外にも技術開発の課題は多いが、筆者の目についたおもなものをひろいあげてみた。技術が日進月歩であることは、後進国が先進国に追いつくためのチャンスがあることを意味する。日本はすでに世界有数の火力国であるが、発電用機器についてはまだまだ最先進国ではない。学界業界をとわず、協力して技術開発に精進したいものである。

参 考 文 献

- (1) 石谷清幹，赤川浩爾：蒸気工学，昭37，コロナ社。
- (2) 石谷清幹：発電用蒸気動力の将来性，日本機械学会誌，64巻508号（昭36—5），P.687～693。