

特集 熱交換技術

蒸気発生器における熱交換技術

The Recent Heat Transfer Design in Fossil-Fired Steam Generators

岩 渕 牧 男*・羽 田 寿 夫**
Makio Iwabuchi Hisao Haneda

1. まえがき

蒸気発生器の熱交換技術において、近年著しい発展遂げた分野は火力発電の分野である。特にここ数年、わが国の電力供給に占める原子力発電の割合の増加に伴って、火力発電の役割はベースロード用から負荷調整用に変化してきた。これに加えて経済水準の高度化は空調需要の増加を促すとともに昼夜間の電力需要格差を一層尖鋭化させている。このための発電設備としては急速な負荷変化さらには急速な起動停止に対応可能で経済性にも優れていることが要求される。したがって、新設の発電設備ではこのような中間負荷運用に適した超臨界圧変圧運転方式が主流となり、熱交換技術の面でも大きな変化が現われた。

図-1は1976年から1990年までの15年間にわが国で運用ないし運用予定の事業用ボイラの形式別分類を示したものである。これから、1980年以降は明らかに超臨界圧変圧運転ボイラの時代に入ったことが理解されよう。この形式のボイラの熱交換技術のもっとも大きな特徴は火炉蒸発管の設計技術にあるが、それは従来の亜臨界圧ボイラおよび超臨界圧ボイラで培われてきた技術の一つのボイラの中で結びつけ、さらに発展させたものである。したがって、ここでは基本となる従来の火炉蒸発管に関する熱交換技術を含めて最近の熱交換技術の発展の状況を紹介することにした。

2. 火炉の伝熱設計技術

一般に、ボイラの火炉の設計技術は燃焼技術のほか、伝熱面配置と火炉水冷壁構造に応じた燃焼ガス側から水側への伝熱技術や構造強度解析技術などを総合した技術の上に成立しているが、伝熱設計では火炉伝熱面で

	定圧形	変圧形
超臨界圧ボイラ		
強制循環ボイラ		
自然循環ボイラ		

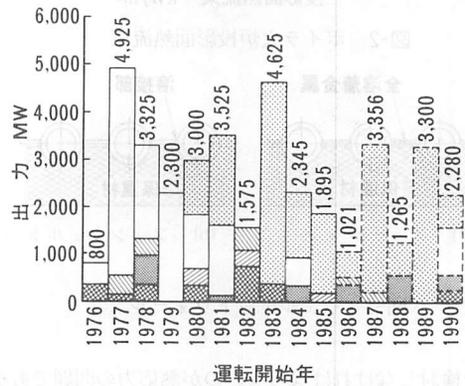


図-1 わが国の新設事業用ボイラの形式別分類

吸収される受熱量すなわち投影面熱流束の予測が出発点となる。これに関しては、火炉形状・火炉容積・燃料の種類・燃焼方式など関係するパラメータの影響が複雑なため実測データの解析結果がベースになるが、一方では理論的予測手法の開発もかなり進んでいる^{1,2)}。図-2は実測された火炉高さの方向の投影面熱流束の一例である³⁾。投影面熱流束は、一般にファイアボールが形成される燃焼室中心部に近いところでもっとも高くなっており、炉巾方向についても中心部がコーナ部よりも高い分布をもっている。そして石炭焚きの場合には燃焼の完結に大きな火炉容積を要し、スラグ付着による汚れ熱抵抗の増加もあって重油焚きにくらべて投影面熱流束が低い。またガス焚きでは不輝炎となることからガスふく射の特性上、熱流束のピークは重油焚きほど高くないのが普通である。

さて、燃焼室の周囲を構成する伝熱面には現在ではほとんど図-3に示すようなウェルデッドウォール(全溶接壁)構造が用いられる。この構造を採用する際に

* 三菱重工業(株)長崎研究所 流体・伝熱総合研究室主査
〒851-03 長崎市深堀町5-717-1
** 三菱重工業(株)原動機事業本部ボイラ技術部主査
〒108 東京都港区芝5-34-6

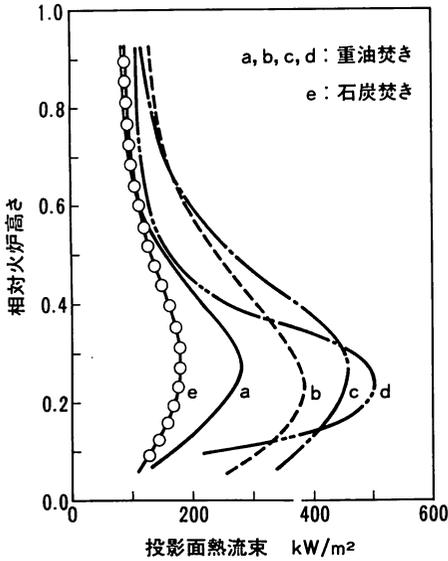


図-2 ボイラ炉熱投影面熱流束

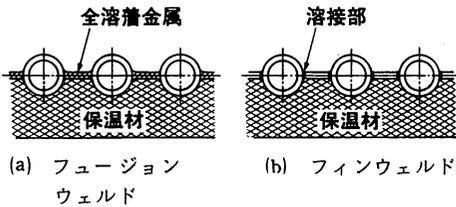


図-3 ウェルデッドウォール

十分検討しなければならないのが熱応力の問題である。これにはウェルデッドウォール面内の温度分布にもとづくものと外部の支持構造との熱伸び差にもとづくものがあるが、いずれにしてもウェルデッドウォール・パネル全体の温度分布状態を正確に把握する必要がある。温度分布は前述のような熱流束分布のパターンと密接に関係しており、許容される温度分布状態を実現するためには適切な管内側冷却条件を選ばなければならない。特に垂直蒸発管を用いる貫流形式のボイラでは、炉巾方向の熱流束分布によって各管の流体温度分布を生じやすいので、管入口オリフィスによる流量配分や蒸発部の途中に設けたミキシングヘッドによって流体温度の均一化をはかっている。

ウェルデッドウォール・パネル全体の温度分布を求める基礎となるのは各管のまわりの局所温度分布の解析である。高温の燃焼ガスから蒸発管外面がうける局所熱流束 q_o と投影面熱流束 q_p との関係は Jones ら⁴⁾ のふく射形態係数の考え方によって求めることができるが、管の中央部では q_o/q_p は cosine 分布に近い分布となる。これに対して管内面での熱流束 q_i は、炉

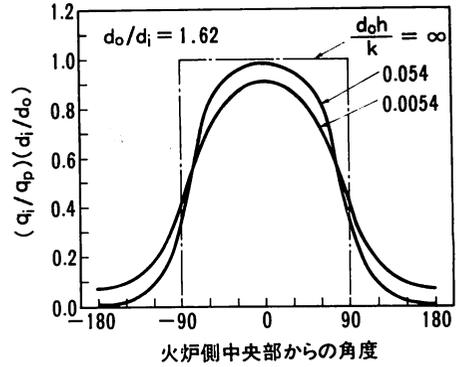


図-4 炉熱蒸発管内面の円周方向熱流束分布

側から保温材で断熱された反対側へ熱が管壁を流れて流れるため、図-4に示すような炉熱の中央側から反対側まで管円周方向に沿ってなだらかに減少するのが特徴である。蒸発管断面の局所温度分布は上述の熱流束分布に対応して決まることになるが、これに関係するパラメータは投影面熱流束、管径、肉厚、管ピッチ、管材の熱伝導率のほか管内の熱伝達率と流体温度である。これら種々のパラメータの影響については、設計に便利のように予め熱伝導解析によって求めておくのが普通である。

ウェルデッドウォール・パネルの温度分布は以上のようにして求められるが、炉熱の伝熱設計の最終の目的は炉熱蒸発管のすべてを許容温度以下に押えらるとともに管と管との間の温度差やパネル全体についての温度分布も許容温度差以下とする蒸発管の冷却条件を見出して、オーバーヒートや過大な熱応力を生ずることなしに高温燃焼ガスから水へ必要な熱を伝える伝熱面を実現することである。以下ではボイラの形式毎に炉熱伝熱面の冷却に必要な条件をどのような方法によって実現しているかをみていくことにする。

3. 亜臨界圧ボイラの伝熱面冷却技術

亜臨界圧ボイラの形式は、表1に示すように蒸気ドラムを有する循環形ボイラと貫流形ボイラに大別され、循環形ボイラはさらに自然循環形と強制循環形に分けられる。

表1 亜臨界圧ボイラの形式

亜臨界圧ボイラ	循環形	自然循環形
		強制循環形
	貫流形	

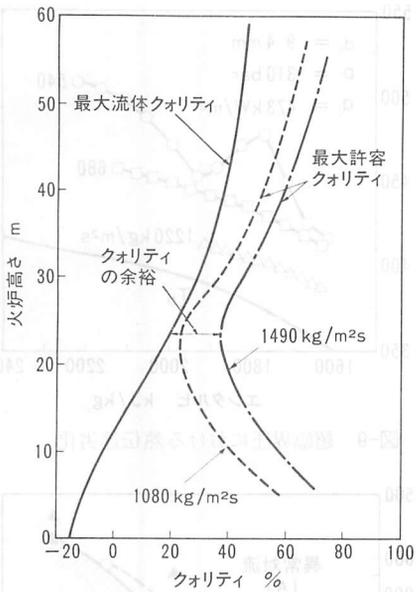


図-5 炉蒸発管のDNB評価

循環形ボイラにおける炉蒸発管保護に関する設計思想は、熱伝達の良好な核沸騰領域だけを利用し、バーナウトを生ぜしめないのが基本方針である。バーナウトは一般に急激な伝熱面温度の上昇を伴う熱伝達劣化現象を指し、蒸気発生器の分野ではDNB (departure from nucleate boiling) あるいはドライアウトと呼ばれることが多い。管内沸騰流におけるDNB発生条件は、圧力、質量速度、熱流束、クオリティ等のパラメータによって決まる。ボイラの場合、圧力と熱流束は別の要因によって与えられるから、炉の伝熱設計ではDNBを避ける質量速度とクオリティまたは循環比の選定が重要課題であり、精度の高いDNBクオリティの予測と循環計算手法が不可欠である。図-5は600MW級微粉炭焼きボイラのDNB評価の例を示す⁵⁾。高さ方向の流体のクオリティはサブクール状態から45%まで熱吸収量に比例して増加する。これに対して、一定質量速度のもとでDNBを発生させない最大許容クオリティは投影面熱流束が高いバーナ上段付近でもっとも低くなる。流体クオリティと最大許容クオリティとの差がDNBに対する余裕であるが、その大きさはボイラの設計条件を考慮して決められる。炉伝熱面の熱流束は高さ方向だけでなく、炉巾方向にも分布をもつことは前にも述べたが、強制循環ボイラでも管入口オリフィスによって質量速度を炉巾方向の熱流束分布に合せて変える設計が行われている。一方、自然循環ボイラでは炉巾方向に熱流束分布による循環力の差にもとづいて質量速度の差を生ずる

ことから、最高熱流束部分についてのDNB評価とともに最低質量速度部分についてのDNB評価を行う必要がある。

現在の亜臨界圧プラントの蒸気条件はタービン入口圧力が165bar級のものが支配的であるが、このときのボイラ炉部分の運転圧力は190bar前後となる。一般に、臨界圧力に近づくにつれて流体の密度差にもとづく循環力が減少することは知られているが、それとともにたとえ同一質量速度であってもDNBも発生しやすくなる。したがって、190bar付近では設計条件によってはDNBの回避が容易でなくなる。これを解決するため採用されているのが図-6に示すライフル管あるいはリブド管と呼ばれる伝熱促進管であり、自然循環ボイラに用いられるだけでなく、補機動力の削減を狙いとした低循環比形の強制循環ボイラにも採用されている。図-7はライフル管のDNBクオリティを平滑管のそれと比較したもので著しい改善がみられる⁶⁾。

以上の循環形ボイラに対して、貫流形ボイラでは火



図-6 ライフル管

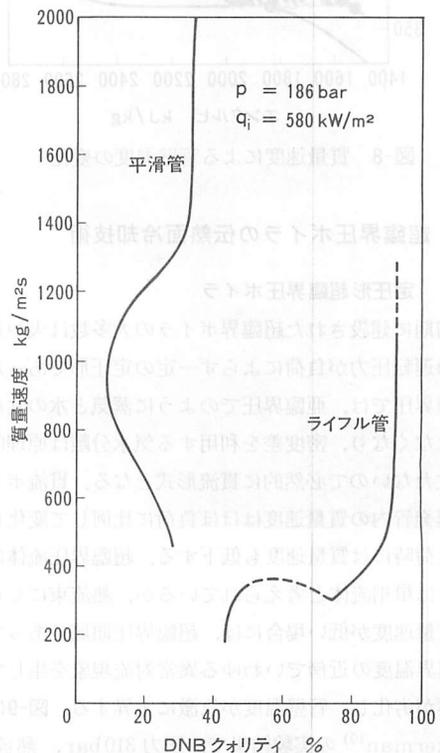


図-7 質量速度とDNBクオリティの関係

炉蒸発管出口で蒸発をほぼ完了させる。このため、管内の蒸発過程でDNBが発生することは避けられず、その下流側では post-DNB 領域の伝熱形態となる。したがって、貫流ボイラの火炉保護の考え方は post-DNB 領域における管壁温度を、比較的高い質量速度を用いることによって、適切な温度レベルに維持するという考え方である。図-8は質量速度による管壁温度の変化を表わしたもので⁷⁾、ある程度以上の質量速度を確保すれば post-DNB 領域の管壁温度を許容温度以下に保てることを示している。管壁温度の予測には核沸騰領域と post-DNB 領域の熱伝達率、それに両領域の範囲を決める DNB クオリティを知る必要がある。核沸騰領域に対しては Rohsenow の相関式⁸⁾、post-DNB 領域に対しては Groeneveld の相関式⁹⁾などが適用可能である。

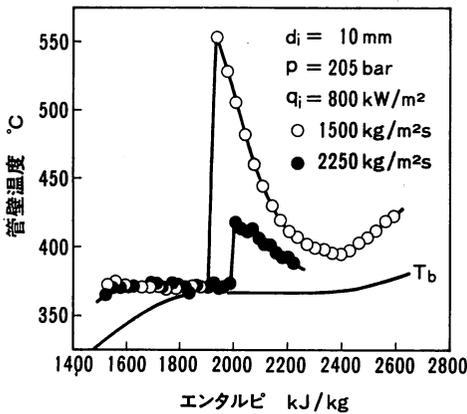


図-8 質量速度による管壁温度の変化

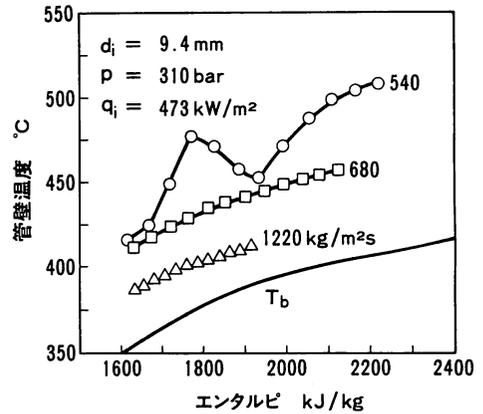


図-9 超臨界圧における熱伝達劣化

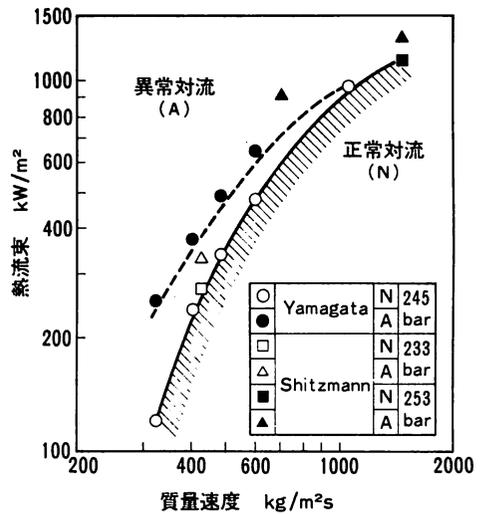


図-9 超臨界圧における熱伝達異常領域判定図

4. 超臨界圧ボイラの伝熱面冷却技術

4.1 定圧形超臨界圧ボイラ

初期に建設された超臨界ボイラの大多数は火炉蒸発部の運転圧力が負荷によらず一定の定圧形であった。超臨界圧では、亜臨界圧でのように蒸気と水の共存状態はなくなり、密度差を利用する気水分離は原理的に成立たないので必然的に貫流形式となる。貫流ボイラの蒸発管内の質量速度はほぼ負荷に比例して変化し、低負荷時には質量速度も低下する。超臨界圧流体は一般には単相流体と考えられているが、熱流束にくらべて質量速度が低い場合には、超臨界圧領域であっても擬臨界温度の近傍でいわゆる異常対流現象を生じて熱伝達が劣化し、管壁温度が急激に上昇する。図-9は、Ackerman¹⁰⁾の実験結果で、圧力310bar、熱流束473kW/m²において質量速度が680kg/m²sから540kg/

m²sまで低下すると管壁温度が急激に上昇している。このような熱伝達劣化現象が表われる範囲は図-10に示すように質量速度の低下とともに低熱流束の領域に広がる¹¹⁾。したがって、超臨界圧ボイラの管内質量速度の選定は最低負荷時の流動安定性の確保とともに熱伝達劣化を生じないための最低許容質量速度から決定される場合が多い。この場合、最大負荷ではむしろ火炉保護に必要な以上の質量速度となり、圧力損失が過大となる。これを解決する一つの方法は、一定の負荷以下において火炉出口の流体の一部をポンプを用いて火炉入口側に再循環させることによって管内質量速度を高める方法で、高負荷領域では質量速度を必要以上に高くせず済むので圧力損失は軽減される。この方式はコンバインド・サーキュレーション(combined circulation)方式と呼ばれ、CE系のボイラに採用されている。この場合、再循環ポンプはエコマイザ出

口からの給水と火炉出口からの再循環流体を混合した後に設置される。もう一つの方法としては低質量流量領域での熱伝達劣化現象の抑制に効果のある伝熱促進管の採用であり、B & W系のボイラではリブ管が用いられている。

4.2 変圧形超臨界圧ボイラ

はじめにも述べたように最近の事業用ボイラで主流となっている超臨界圧変圧運転方式は、最大負荷付近では超臨界圧運転を行い、負荷の減少とともに運転圧力を低下させる運転方式であるが、一般には変圧運転開始点の負荷が75%ないし95%の複合変圧運転方式が採用される。これによって、タービン側に供給する蒸気温度は、従来の定圧運転方式とくらべて広い負荷範囲で比較的一定温度に維持でき、頻繁な負荷変動に対しても熱応力が軽減され、もっとも厳しいタービンの寿命が改善される。また、部分負荷領域での蒸気消費率も改善され、熱効率が向上する。しかし一方で、この運転方式はボイラに対しては相当に厳しい設計条件を課することになる。

図-11は各負荷におけるボイラ各部の運転状態を圧力-エンタルピ線図上に表わしたものである。この例では、流体エンタルピは火炉入口で負荷に応じて1,100 kJ/kgから1,400 kJ/kgの間にあり、火炉出口では2,400 kJ/kg前後となる。また、78%負荷で火炉運転圧力は臨界圧となり、それ以下の負荷では亜臨界圧運転となる。したがって、火炉蒸発管では負荷に応じて、亜臨界圧におけるDNB特性とpost-DNB領域の熱伝達、

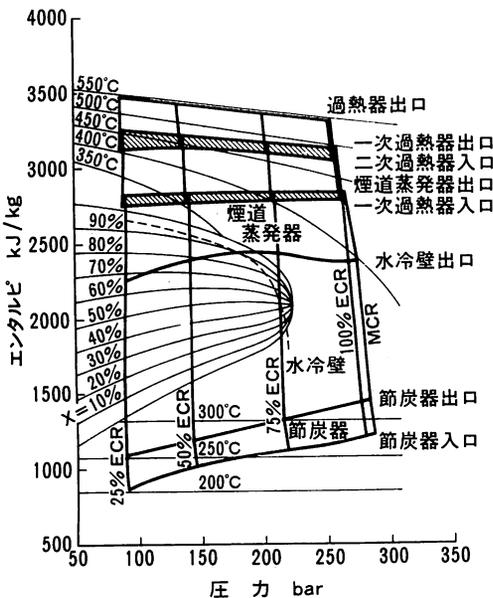


図-11 負荷によるボイラ運転状態の変化

超臨界圧における熱伝達と異常対流領域の判定、それに流動損失の問題を含めて管内伝熱流動現象のほとんどすべての問題が出現する。このことから、設計技術として要求されるのは、これら複雑なすべての現象をクリアにしてその予測を可能にし、全負荷範囲にわたって信頼性の高い運転を確保できる設計点を見出す技術である。

(1) スパイラルリウンド型

亜臨界圧の領域で熱流束を一定としたときに得られる平滑管の管壁温度は、図-8に示したように、DNB発生直後にもっとも高くなり、熱伝達率は極小値をとる。臨界圧の近傍を含めて平滑管の極小熱伝達率がどのように変化するかを示したのが図-12である¹²⁾。極小熱伝達率は熱流束の値にかかわらず臨界圧よりも僅かに低い212bar付近で急激に低下しており、その両側では相当高いレベルまで回復する。そして206bar以下では圧力の減少とともに極小熱伝達率は再び低下の傾向を示す。この傾向を変圧運転ボイラの運転特性と重ね合せると、火炉蒸発管をオーバーヒートから保護する冷却能力がもっとも厳しくなるのは圧力とともに質量速度も減少する50%ないし25%負荷の領域である。したがって、この領域で熱伝達率を十分に高く保ち、管壁温度を許容温度以下に維持するためには、同じ熱流束であっても超臨界圧の場合にくらべて相当に高い質量速度を確保しなければならない。

以上のような必要性を充たすために採用されたのがスパイラルリウンド形と呼ばれる火炉構造である。これは図-13に示すように投影面熱流束の高い燃焼室の周囲を傾斜した並列管群でスパイラル状に囲んだことから名付けられた構造で、並列管の本数を垂直並列管群の場合にくらべて1/2ないし1/3程度に減らすこと

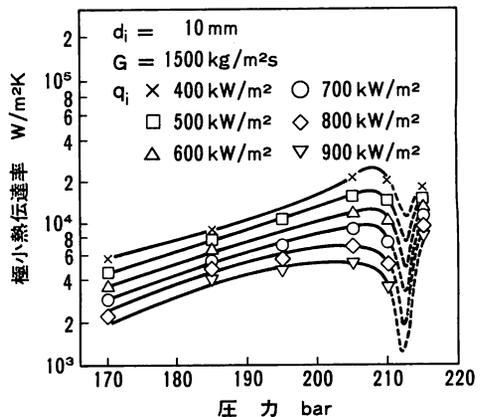


図-12 平滑管における極小熱伝達率

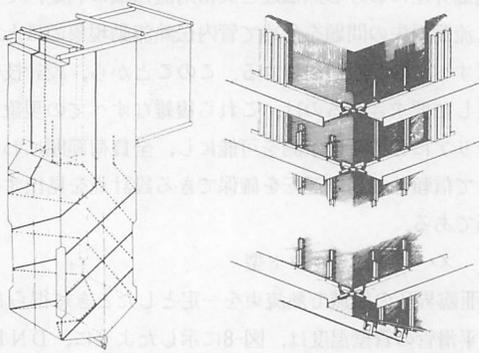


図-13 スパイラルワウンド形火炉構造

によって管内の質量速度を高めることができる。もちろん垂直並列管群であっても管ピッチを拡げて管本数を減らすことは理論的には可能であるが、この場合にはウェルデッドウォールのフィンの部分の間隔が長くなってメタル温度が上昇し、また管1本当りの熱吸収量も増加することから、実現できるのは極めて狭い範囲での管本数の減少に限られる。したがって、現在までに実用化されている超臨界圧変圧運転ボイラで採用されている火炉構造はすべてスパイラルワウンド形であって、スパイラル部分から火炉上部の垂直上昇管部分への移行接続部やバーナ開口部などの細部構造についてボイラメーカーによる差異がみられるに過ぎない。

(2) 垂直蒸発管形

上述のように、亜臨界圧低負荷領域でのDNB発生後の蒸発管の管壁温度の上昇は、平滑管を用いる限り避けることはできないが、質量速度を高めることによって温度上昇を許容温度以下に抑制することは可能である。しかしそのためにはスパイラルワウンド形火炉構造を採用しなければならなかった。この構造は従来

の定圧形超臨界圧ボイラ等で採用されている垂直蒸発管形火炉構造にくらべ、火炉の支持構造などを含めてある程度複雑にならざるを得ない。このため、伝熱特性の優れたライフル管を用いることによって亜臨界圧での熱伝達劣化による過大な管壁温度の上昇を抑制し、火炉構造の簡単な垂直蒸発管形超臨界圧変圧運転ボイラを実現しようという構想は以前から存在した。

図-14に示すのは、垂直配置のライフル管の管壁温度を、実際の火炉蒸発管の場合とほとんど同じ熱流束分布が得られる半円周加熱条件のもとで測定した結果である¹³⁾。質量速度1,240 kg/m²s、円周方向最大熱流束580 kW/m²において、圧力211 barでの管壁温度は流体エンタルピ2,250 kJ/kg、クォリティで80%の付近まで核沸騰が保たれることを示しており、DNB発生後の管壁温度の上昇も緩やかである。このような良好な伝熱特性は図-7に示したように圧力が低下するとさらに低い質量速度においても十分維持される。これに対して、圧力が高くなる場合には、この図のようにDNB点のエンタルピは急激に低下し、DNB発生後の管壁温度は213 barで425°C、216 barで410°Cと変化するが、臨界圧の221 barでは管壁温度の明確なピークは表われなくなる。図-15は管壁温度のピークの点に相当するライフル管の極小熱伝達率が圧力によって変る様子を類似の条件の平滑管の場合と比較して示したものである。これから、ライフル管での極小熱伝達率は213 bar付近で最低となるものの、その値は平滑管の場合にくらべて大巾に向上していることが分かる。

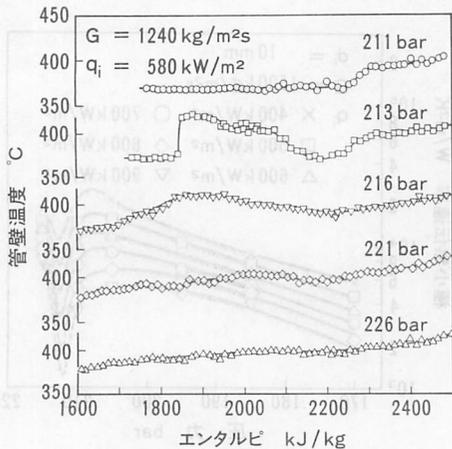


図-14 ライフル管の管壁温度

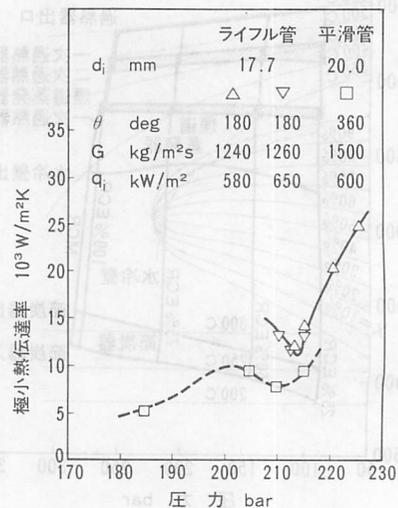


図-15 ライフル管における極小熱伝達率

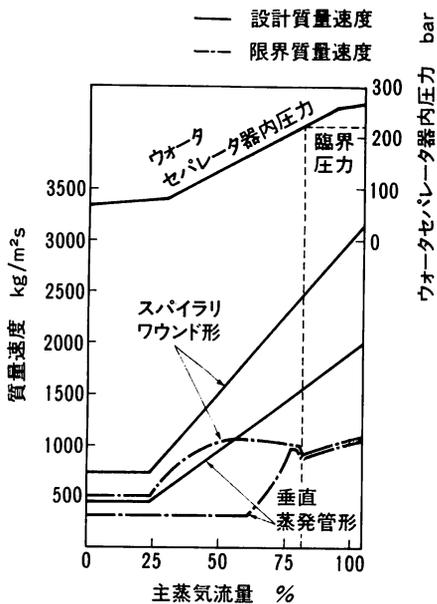


図-16 超臨界圧変圧運転ボイラの火炉蒸発管内質量速度

したがって、ライフル管では平滑管よりも低い質量速度で臨界圧近傍の熱伝達劣化による管壁温度の上昇を適切な温度レベルに抑制することが可能であり、低圧ではほぼ全蒸発領域にわたって核沸騰が維持できる。このようなライフル管の特性を利用して垂直蒸発管形超臨界圧変圧運転ボイラを実現できることが十分な技術検討を経てすでに確認されている。図-16は超臨界圧変圧運転ボイラにおけるスパイラルワウンド形および垂直蒸発管形の両形式の設計質量速度と限界質量速度つまり許容しうる最低質量速度との関係を示したものである。設計裕度を意味する設計質量速度と限界質量速度との差は、前述のようにスパイラルワウンド形では低圧領域で厳しいのに対し、垂直蒸発管形では臨界圧よりも少し低い圧力領域で厳しいことが示されている。

5. むすび

以上でみてきたように、火力発電分野における蒸気発生器つまり蒸気ボイラの最重要部分ともいえる火炉伝熱面に関する熱交換技術をまとめると、

- (1) 投影面熱流束 = (火炉水冷壁熱吸収量) の予測
- (2) 不均一加熱管の熱伝導解析
- (3) 管内強制対流熱伝達率の評価
 - ・流体領域
 - ・核沸騰領域

- ・DNB
- ・post-DNB領域
- ・過熱蒸気領域
- ・遷移域を含む超臨界圧領域

となる。そして現在の事業用ボイラの主流をなす超臨界圧変圧運転ボイラでは、(1)と(2)に加えて(3)の管内強制対流熱伝達の問題がすべて取扱われており、その設計プラクティスにおいては、経済面での要求に加えて過酷ともいえる運用面での要求に応えるため、上述の技術を駆使した“限界設計”が追求されている。この分野の技術はかつてのように経験工学の上だけに成立っているのではなく、高度な実験を含む組織的な研究開発を背景に新しい技術の実用化に挑戦しているのが現在の姿である。3年後の1989年に運開される予定の世界で最初の310 bar、700MW級大容量超々臨界圧変圧運転ボイラは、ライフル管を採用した垂直蒸発管形の変圧運転ボイラとして計画されていることを最後に付け加えておきたい。

参考文献

- 1) 坂井正康ほか；三菱重工技報, Vol. 20, No. 5 (1983), 496~505
- 2) 早坂洋史, 工藤一彦, 谷口 博；日本機械学会論文集, 51巻, 467号(1985), 2202~2210
- 3) Pich, R.; Energie, Vol. 15, No. 10 (1963), 402~411
- 4) Jones, C.E., and Weinstein, J.L.; ASME Paper No. 62-WA-131
- 5) Wiener, M.; Proc. Amer. Power Conf., Vol. 39 (1977), 336~348
- 6) 河村友植ほか；三菱重工技報, Vol. 17, No. 2 (1980), 109~119
- 7) Herkenrath, H., et al.; EUR3658 d (1967)
- 8) Rohsenow, W. M.; Lecture at symposium on heat transfer, Univ. of Michigan Press. (1953), 101~150
- 9) Groeneveld, D. C.; AECL-4513 (1973)
- 10) Acherman, J. W.; ASME Paper No. 69-WA/HT-2
- 11) Yamagata, K., et al., JSME 1967 Semi-International Symposium, Vol. 2, 145~154
- 12) Bähr, A., et al.; BWK, Vol. 21, No. 12 (1969) 631~633
- 13) Iwabuchi, M., Tateiwa, M., Haneda, H.; Proc. 7th Int. Heat Transfer Conf., München, Vol. 5 (1983), 313~318