

超高温・高圧蒸気タービン

Steam Turbines for Ultra High Temperature and Pressure Use

火力プラントの蒸気条件改善によるプラント性能の抜本的向上が、省エネルギーの一方法として採り上げられ、超高温、高圧火力プラントとして開発計画が進められつつある。

この超高温・高圧火力プラントは、蒸気圧力だけ改善する方法については現行技術の範囲で実現可能であるが、より高性能化のための超高温化に対しては、新材料の開発などかなりの革新的技術の開発が必要である。

この中で、蒸気温度を現行の566℃を593℃に改善する開発ステップに対しては、現行材料の応用と改善の範囲にあり、当該プラントの至近年開発が可能といえる。

本報では、593℃用蒸気タービン用材料として現行の12Cr鋼の耐熱特性の改善の見通し、及びこれらの材料開発を基に次期火力として有望視される、出力1,000MW、蒸気条件316atg、593/566/566℃の蒸気タービンの構造について技術課題を紹介する。

久野勝邦* Katsukuni Hisano

桐原誠信** Seishin Kirihara

植西 晃*** Akira Uenishi

1 緒 言

火力プラントの抜本的性能向上により省エネルギー、省資源を図る方法は、在来の蒸気条件を超高圧化及び超高温化へ改善することによって達成可能であり¹⁾、既に、蒸気圧力だけを超高圧化する超高温・高圧蒸気火力プラントの具体的計画が進みつつある。

この蒸気条件の圧力だけを超高圧化する方法は、現行の設計技術で対応可能な開発条件であり、超高温・高圧火力プラントのステップ1として位置づけている。これに対し、プラントのいっそう高効率化を図る蒸気条件の超高圧、超高温化の方法は、プラントの構成材料などに対し超高温化に適応できる新しい技術開発が必要である。超高温化のレベルとしては、フェライト系耐熱材料の使用限界温度である593℃級を開発のステップ2と位置づけ、主要部材料としてオーステナイト系の材料が必要となる649℃級をステップ3としている。

次期高性能火力プラントとしてどのステップが経済的に有利であるかは、開発のテンポ、機器コスト、燃料コストなどの総合評価によって決定されるが、燃料コストの先行が不鮮明であるため現在のところ確度の高い評価は困難である。

しかし、開発テンポの促進は省エネルギーの観点から急務であり、現行技術の応用が可能であるとともに、現行材料を基本とした耐熱材料の超高温化への改善が可能である593℃級のプラントの開発が、技術革新に大きな飛躍もなく比較的至近年開発が可能なステップといえる。

超高温・高圧火力プラントとしては、実験的色彩が強く、かつ比較的小規模なプラントとはいえ、1950年代後半に運開した米国のEddystone # 1、Philo # 6などの先行プラントがあり²⁾、超高温化に対する開発上の諸問題に関しては、これらプラントの運用経験の活用が可能であるが、プラントの大容量化による経済的インパクトの大きさを十分認識し、プラントの規模に伴う技術的な諸問題を克服し、プラントの高い運用信頼性を確保することが肝要である。

本報告では、以上の状況をもとに蒸気条件の超高温化に対する耐熱材料の開発の見通しと、出力1,000MW、蒸気条件316atg、593/566/566℃の蒸気タービンの構造上の技術課題に

ついて概説する。

2 超高温・高圧火力プラント用蒸気タービン

図1は、出力1,000MW、蒸気条件316atg、593/566/566℃のステップ2のプラントのヒートバランスであり、在来の246atg、538/538℃のプラントに対し約6%、圧力だけ上昇させる超高温・高圧プラント、すなわち316atg、538/552/566℃のステップ1の条件に対しては2%程度のプラント性能の向上を目標としている。本プラントの蒸気タービンは、再熱蒸気圧力の適性化によって、中圧タービン以降のタービンに対しては、既存の実績コンポーネントを採用しプラントの信頼性の向上を図っている。

タービンは、全体として4車室で、プライマリ軸、セコンダリ軸をもつ2スピード2軸構成である。2軸はそれぞれ約600MW、400MWを出力する。

超高圧タービンと高圧タービンとは対向1車室形であり、蒸気は超高圧タービン後再熱され、高圧タービンに流入する構成である。この超高圧と高圧タービンとの1車室化(以下、超高圧セクションと略す。)によってプラント全体のコンパクト化を図るとともに、593℃用超高温用蒸気タービンとして必要な主な開発要素を、ほぼこの超高圧セクションに集約している。

この超高圧セクションの技術課題の解決に際しては、

- (1) 前述の先行プラントの運用経験の活用
- (2) 経済的なインパクトが大きいいため、プラント規模に対する十分な認識と高度の信頼性
- (3) 技術的な裏付け

などを十分に留意する必要がある。このため、超高温用蒸気タービンの開発に際しては、今までの耐熱材料の開発経験に基づく材料開発を軸としたアプローチの方法を取っており、耐熱特性の劣る材料を冷却で補うという方法をとっていない。すなわち、開発に際しては冷却技術は新しいプラントの信頼性をより確かなものにするための付加要素として考えている。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立研究所 工学博士 *** 日立製作所機械研究所 工学博士

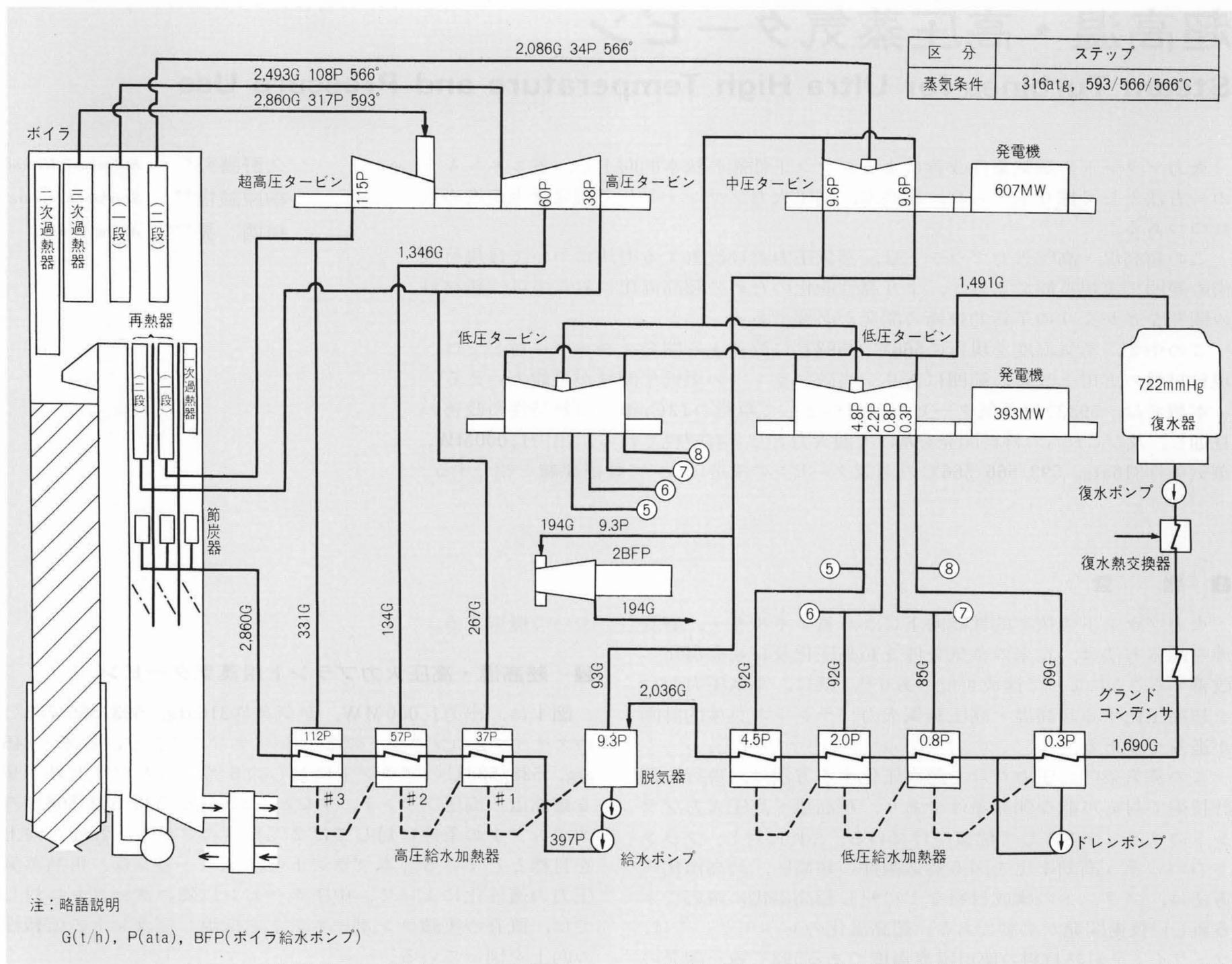


図1 超高温・高圧火力プラント熱平衡線図(ステップ2) 再熱圧力の適性化によって中圧タービン、低圧タービンの既存実績コンポーネントの採用を図るとともに、在来の316atg, 538/538°Cに対し6%の、超高温・高圧火力プラントステップ1に対しても2%程度のプラント性能の向上を目標としている。

3 耐熱材料の選定

現行の蒸気条件で要求されているプラントの運用条件、すなわち毎日起動停止、最低負荷運転などは、当該超高温・高圧火力プラントに対しても同レベルないしそれ以上の要請があるとの観点から、材料選定に際しては、

- (1) 各部材に作用する応力は、現行と同等ないしそれ以上と考える。
 - (2) 該当材料の許容応力は、その使用温度で、現行条件下での現用材料の許容応力と同等ないしそれ以上とする。
- などの考え方を基本に、材料の目標強度を定めている。図2～5は、この考え方を具体的に示したもので、材料強度に対し代表的なものを例示した。

図2は、材料の高温引張り強度に対するもので、STBA24とSUS316TBを比較例示した。STBA24が600°Cで使用されるとき許容応力が2.4kg/mm²ならば、700°CでのSUS316TBの許容応力が2.4kg/mm²よりも大きな場合、前述の条件を満足したこととなる。この高温引張り特性の要件は、温度条件の変わるすべての部材に適用される。図3は、ロータ、翼、ボルト、ケーシングなどの主要部材に必要なクリープ強度に対する要件を示す。10⁵時間クリープ破断強度が、昇温後

(593°C)の条件で昇温前(566°C)の現行材料と同程度ないしそれ以上の値をもつ材料が必要であることを示す。

図4、5は疲労強度に対する要件であるが、前者は動翼、後者はロータが主要対象部材となる。

図6は、593°C用耐熱翼材料として開発中の改良形12Cr鋼

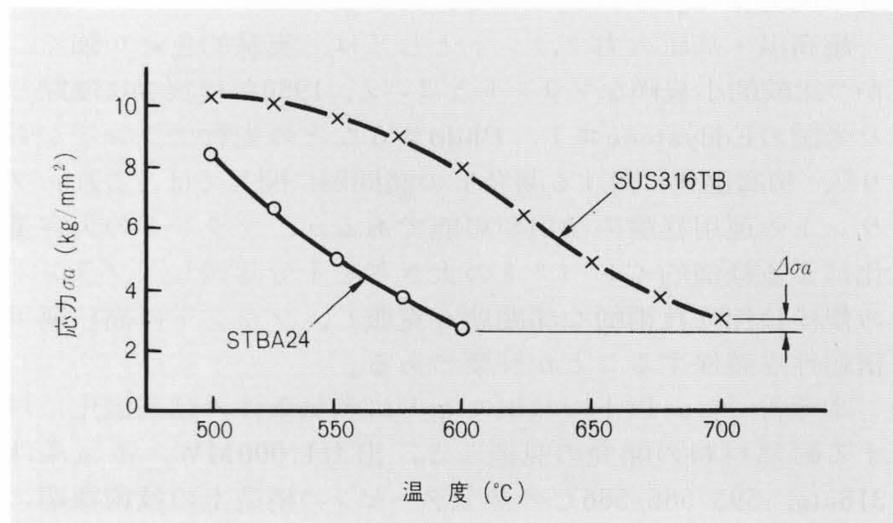


図2 材料選定の基本的考え方(高温引張り強度) 次式のような関係を満足させることが必要である。 $\Delta\sigma_a - \sigma_a(\text{SUS316TB, at } 700^\circ\text{C}) - \sigma_a(\text{STBA24, at } 600^\circ\text{C}) \geq 0$

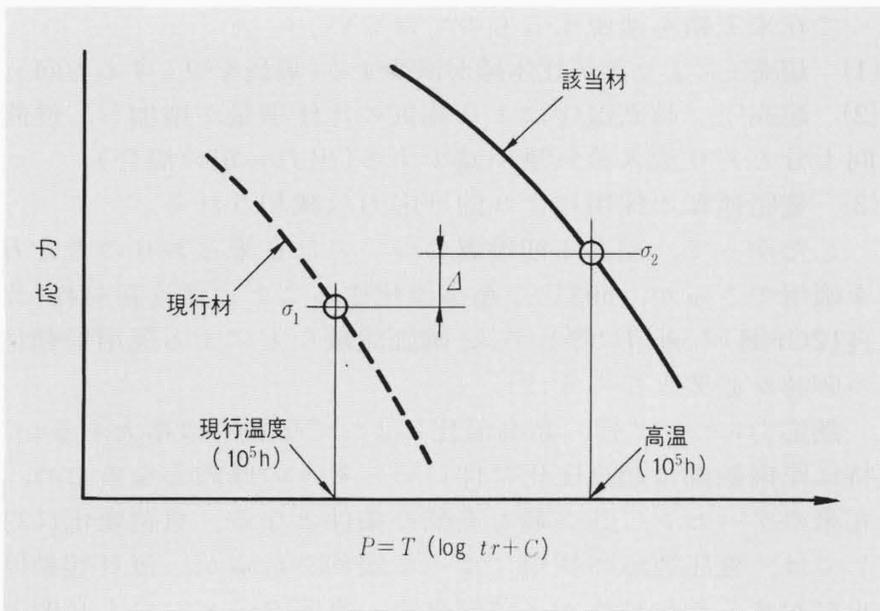


図3 材料選定の基本的考え方(クリープ破断強度) Larson-Millerのパラメータで整理した場合、次式を満足させることが目標である。
 $\Delta = \sigma_2 - \sigma_1 \geq 0$

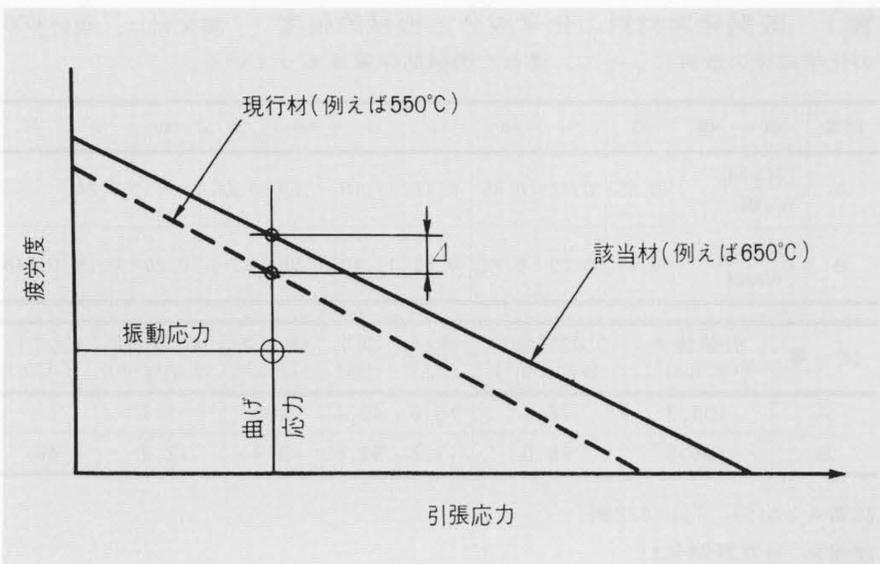


図4 材料選定の基本的考え方(疲労強度) 動翼の材料の評価に必要である。振動応力と曲げ応力との交点となる○印が、斜線の下側となることが必要で、かつ次式を満足させることが必要である。 $\Delta = \text{該当材}(650^\circ\text{C}) - \text{現用材}(550^\circ\text{C}) \geq 0$

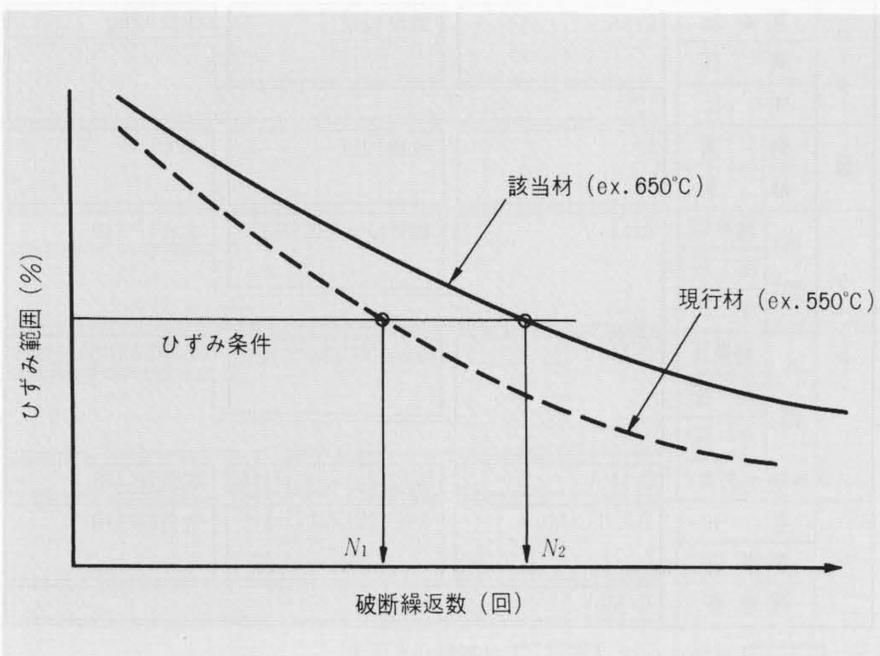


図5 材料選定の基本的考え方(低サイクル疲労) 図に示す低サイクル疲労破断曲線で該当材の適否が判定される。同じひずみ範囲で、かつ与えられた温度条件で、次式が満足することが必要である。 $N_2 - N_1 \geq 0$

の強度特性を図3の指針に基づき例示したもので、現用の翼材料であるCrMoWV鋼とクリープ破断強度を対比したものである。593°Cでの10⁵時間破断強度は、CrMoWV鋼の566°C(現用の最高蒸気温度)での10⁵時間破断強度をしのぐ値を示している。

この材料開発の手法は、既に10年前に高温強度の改善を目的に開発した翼材料の経験に基づいており³⁾、当該翼材料は実際のプラントで高温ボルト材料として6年以上の使用実績をもち、その改善効果は実証されている。表1に当該材料の化学組成及び機械的強度を示す。A鋼が現用材、B鋼が開発材料である。図7、8はこれら2種の翼材料のクリープ破断強度、及び耐使用中脆化特性を例示比較したものであるが、開発材料は現用材に比べて優れた特性を示すことが分かる。なお、当該開発材料は、翼材料として必要な切削性、打抜き性、かしめ性などの加工性についても確認されている。

図6に示したものは、表1に示した開発材料を更に593°C用に改善を加えたものである。図7の結果と比較すると、593°C用に開発中の翼材料のクリープ破断強度は20%改善されており、現用材と比較すると約60%の改善となっている。

以上の翼材料に対する開発経験と、Nb入り12Crロータ材料、低脆化高靱性CrMoVロータ材料、高強度B入りCrMoV鋳鋼、更に高靱性CrMoV鋳鋼などの材料開発経験とを総合することによって、593°C用蒸気タービンの主要部材として適切かつ信頼性の高い耐熱材料の選定が可能である。

以上の超高温用耐熱材料の開発見通しにより、593°C用蒸気タービンの各部主要材料は、図9に示すようにケーシング、ロータ、翼など大半が改良形の12Crをベースとする材料となる。

4 超高温・高圧タービンの構造

超高压化、超高温化による構造上の主要な問題点を蒸気タービンの超高压部を対象(他のセクションは既存実績コンポーネントを活用するため、設計技術上の問題はない。)に述べる。

前項で、当該タービンの材料選定の方法について述べたが、超高温化に対応した温度で規格化された材料選定を行なうと、

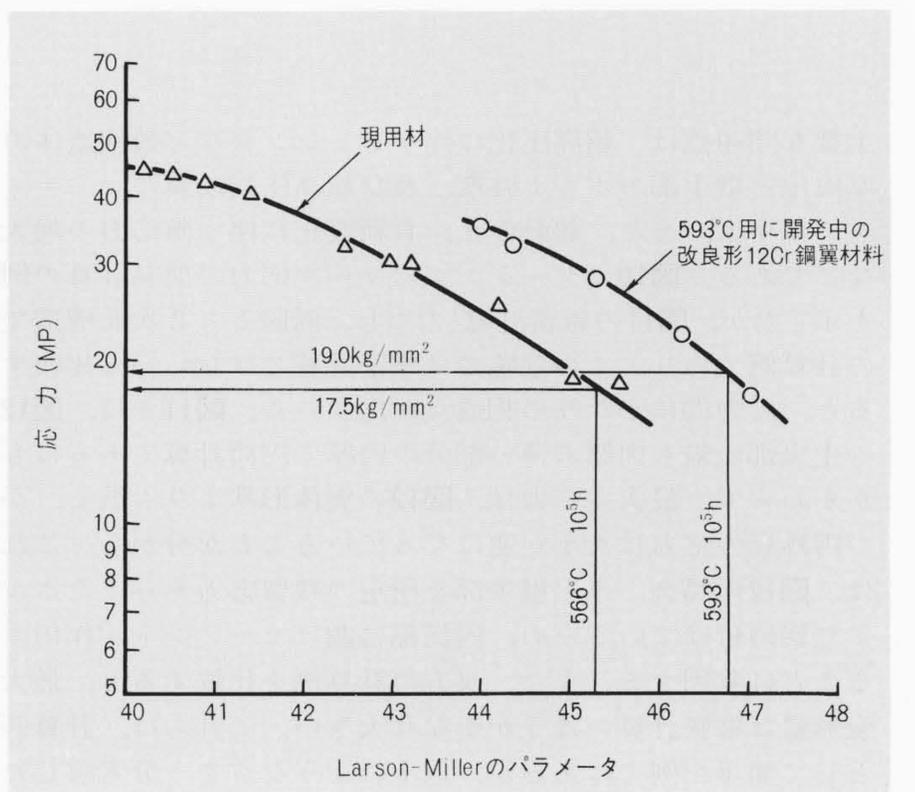


図6 改良形12Cr鋼翼材料のクリープ破断強度 12Cr鋼の高温強度の改良経験と実績をベースに、現用の耐熱最高強度の翼材料の改質を図り、クリープ破断強度の大幅改善を可能とした。593°C、10⁵時間破断強度は、現用材の566°C、10⁵時間の値をしのいでいる。

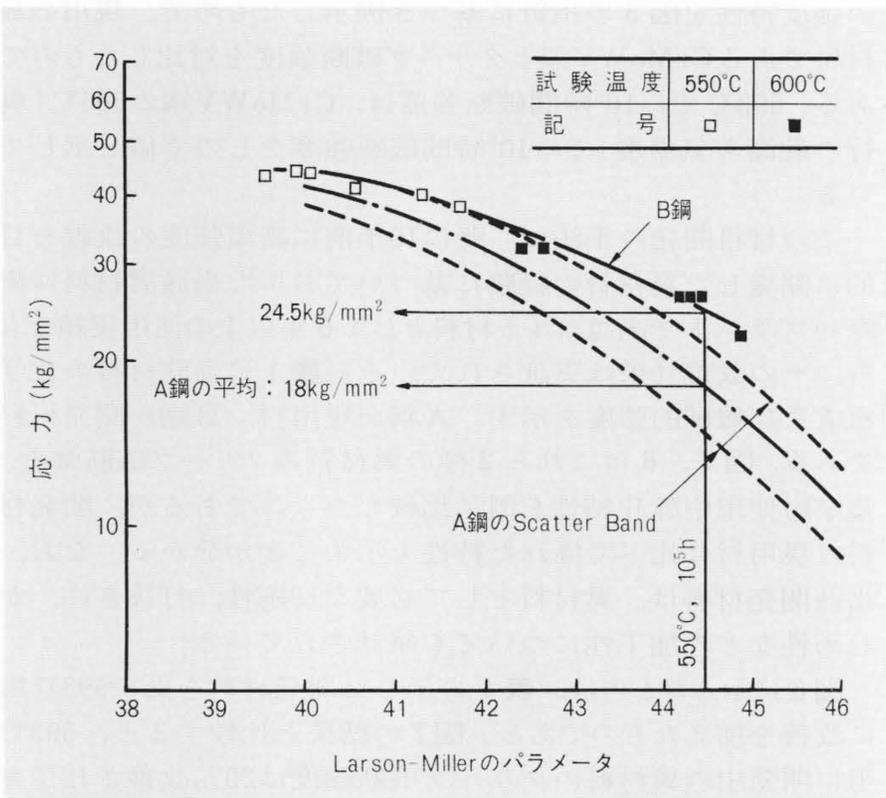


図7 既開発翼材料のクリープ破断強度 現用材の改質によって、開発材は優れたクリープ破断強度をもっており、550°C、10⁵時間破断強度は40%近く改善されている。

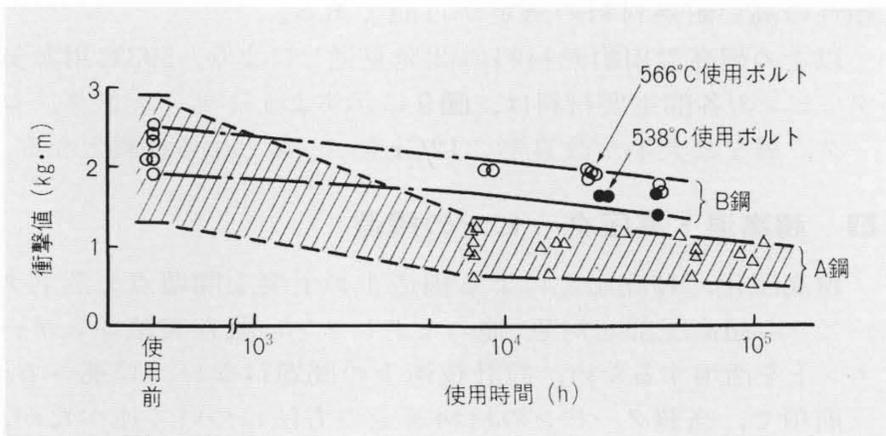


図8 既開発翼材料の脆化特性 開発材料は、現用材に比べて良好な耐脆化特性をもっており、長時間の高温に暴露しても衝撃値の低下は極めて少ない。

主要な問題点は、超高压化に伴うケーシングなど殻構造体の厚肉化と継手部のボルト強度、及び超高压初段翼のローディングの増大、また、起動停止、負荷変化に伴う熱応力の増大などである。図10にケーシングのフープ応力の簡易計算の例を示したが、図11の厳密計算(ただし、両図とも2次元構造での計算例であり、この意味では厳密計算ではない。)と比較すると、応力的にかなりの相違点が出ている。図11では、図12の中央部の最も肉厚の薄い部分の肉厚で円筒計算であるにもかかわらず、最大主応力は、図12の実体形状よりも低く、かつ円外周の応力は大小が逆になっていることが分かる。これは、図12の場合、水平継手部を所定の残留応力を与えたボルトで締め付けているため、円筒部に曲げモーメントが作用することに起因する。また、双方の計算例を比較すると、最大変形量は厳密計算のほうがかなり大きい。これらは、計算例として簡単な例ではあるが、以上のような点を十分考慮した厚肉殻の設計が肝要である。

超高压初段翼の場合は、超高压化によって差圧が増大し翼のローディング、すなわち曲げモーメントが増大することになるが、在来の実績の曲げ応力と比較すると以下の理由によ

って在来実績を逸脱するものではない。

- (1) 超高压により蒸気比体積が減少する(翼長を短くする方向)。
- (2) 超高压、超高温化により蒸気の比仕事量が増加し、性能向上分もあり流入蒸気量が減少する(出力一定の場合)。
- (3) 変圧運転の採用により曲げ応力は緩和される。

したがって、超高压初段翼については在来どおりの考え方を適用できるが、593°Cと超高温化することに伴う新材料(改良12Cr鋼)の適用に際しては、確証試験などによる運用信頼性の確認が必要となる。

熱応力については、超高温化によって必然的に増大するが、特に厚肉殻部は超高压化に伴い厚肉となるため、在来のタービンに比べ最も過酷な条件となる。負荷変化に対しては、変圧運転の採用によって緩和されるが、毎日起動停止に対する起動特性が当該超高温・高压タービンにも必要と考えられるため、熱応力の緩和ないし管理(ロータとともにケーシングに対しても寿命消費率管理)には十分な配慮が必要となる。当該タービンの超高压部が、12Cr鋼を基調とする材料

表1 既開発翼材料の化学成分と機械的強度 開発材は、現行材料の化学成分の改質によって、優れた機械的性質をもっている。

試番	鋼種	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	W	Nb	V	N
A	12CrMo-WV鋼	0.25	0.42	0.85	0.77	11.10	1.03	1.06	—	0.24	—
B	11CrMoNb-VWN鋼	0.17	0.29	0.73	0.63	11.40	0.96	0.16	0.20	0.19	0.048

試番	引張強さ (kg/mm²)	0.02%耐力 (kg/mm²)	伸び (%)	絞り (%)	硬さ (HB)	衝撃値 vE ₂₀ (kg·m)	FATT (°C)
A	104.3	76.6	15.6	40.4	298	1.7	—
B	105.8	78.0	17.8	52.6	319	2.2	46

試番A: AISI Type422鋼

試番B: 日立既開発材

注: 略語説明 FATT(破面遷移温度)

開発ステップ		蒸気条件			
		ステップ1	ステップ2	ステップ3	
主要部品名		316atg 538/552/566°C	316atg 593/566/566°C	352atg 649/566/566°C	
ロータ	超高压	CrMoV	改良12Cr	改良A286	
	高压				
	中压	12Cr			
翼	動翼	12Cr	改良12Cr	A286	
	静翼				
ケーシング	内部	超高压	CrMoV	改良12Cr又はTP316	改良TP316
		高压			
		中压			
	外部	超高压	CrMoV	改良12Cr又はB入りCrMoV	改良TP316又はB入りCrMoV
		高压			
		中压			
ノズルボックス		CrMoV	改良12Cr又はTP316	改良TP316	
弁	主弁	B入りCrMoV	改良12Cr又はTP316	改良TP316	
	加減弁				
	再熱弁	CrMoV			

注: は現用材料, は新材料を示す。

図9 超高温・高压タービンの主要部材料 本報の試設計になるステップ2のタービンは、超高压及び高压タービンを一体形に構成するとともに、改良形の12Cr鋼を主体とする材料選定となっている。

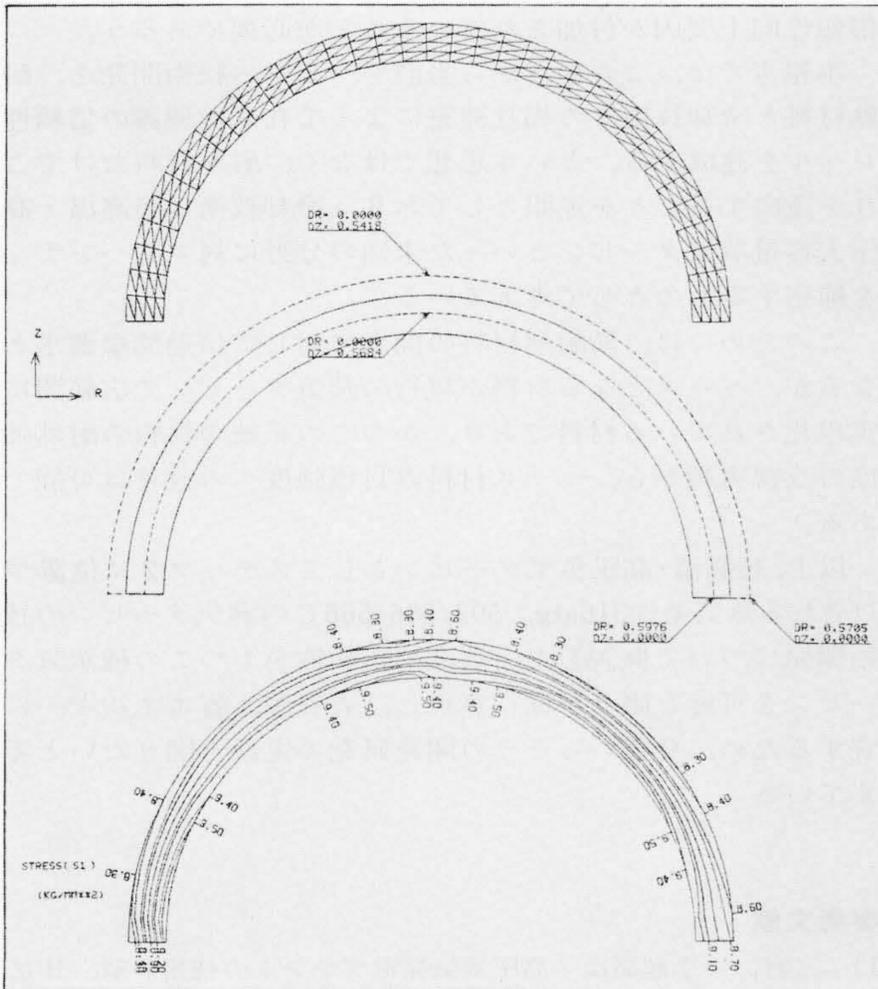


図10 ケーシングのフープ応力(円筒計算) ケーシングのフープ応力は、円筒モデルによる簡易計算で近似的に求めることができるが、図11の厳密計算との差を十分認識しておくことが肝要である。

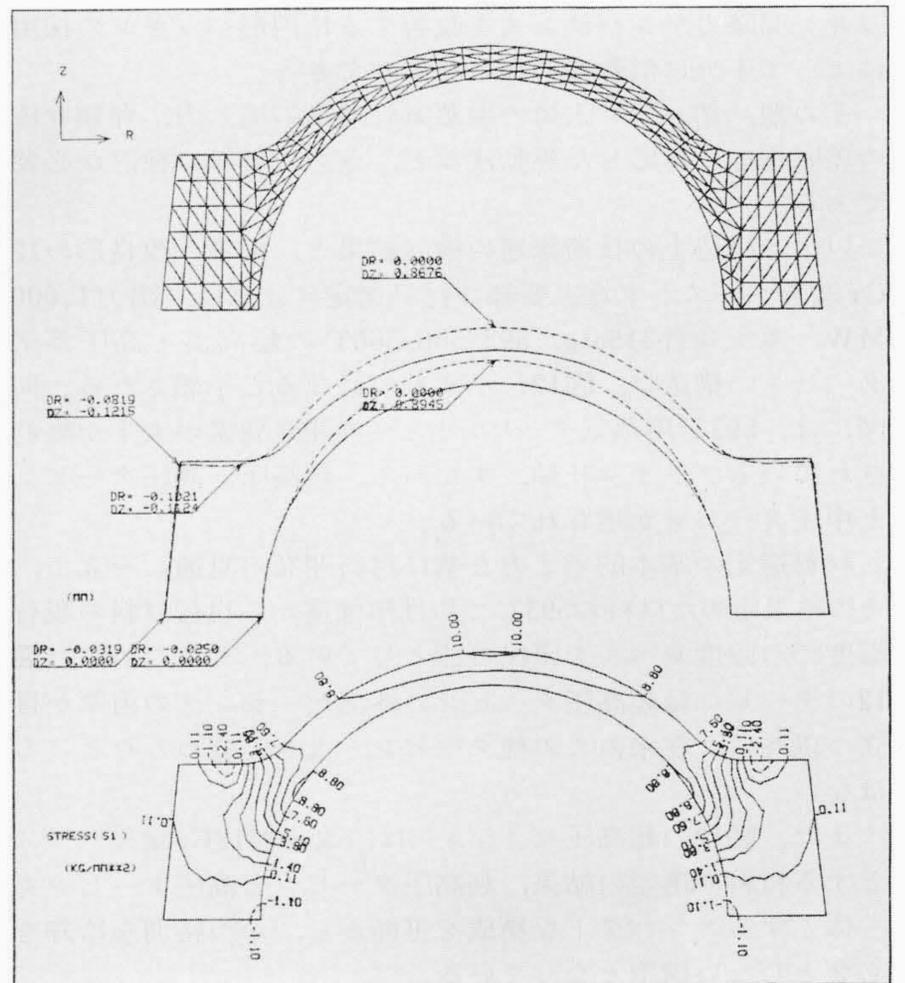


図11 ケーシングのフープ応力(フランジあり) フランジに締付力が作用しており、そのため円筒部には曲げモーメントが作用し、外周のほうが高い応力となる。また、図10の単純な円筒計算より応力は大きく、かつ変形量の絶対値も大きくなる。

選定を行なっているのは、これらの材料の熱的物性値が、在来のCrMoV系の低合金鋼よりも若干優れている点にもある。

以上の部材強度に関する問題のほかに、ロータの回転機能上の問題があるが、4車室2スピード二軸構成のタービンは、実績的に十分経験のあるものであり、振動応答上特に問題はないが、不安定振動に対しては高密度蒸気流入によるスチー

ムホワール(広義のガスホワール)の発生ポテンシャルの増加を考慮する必要はある。しかし、縦形の回転体と異なりジャイロ作用が小さい横形回転体での発生は顕著ではなく、在来機のホワール係数(定性的には、パッキン漏洩蒸気に基づく不平衡回転力とロータ剛性の比)以下に保つこと、及び耐振形軸受として安定性の高いティルティングパッド軸受、更にはパ

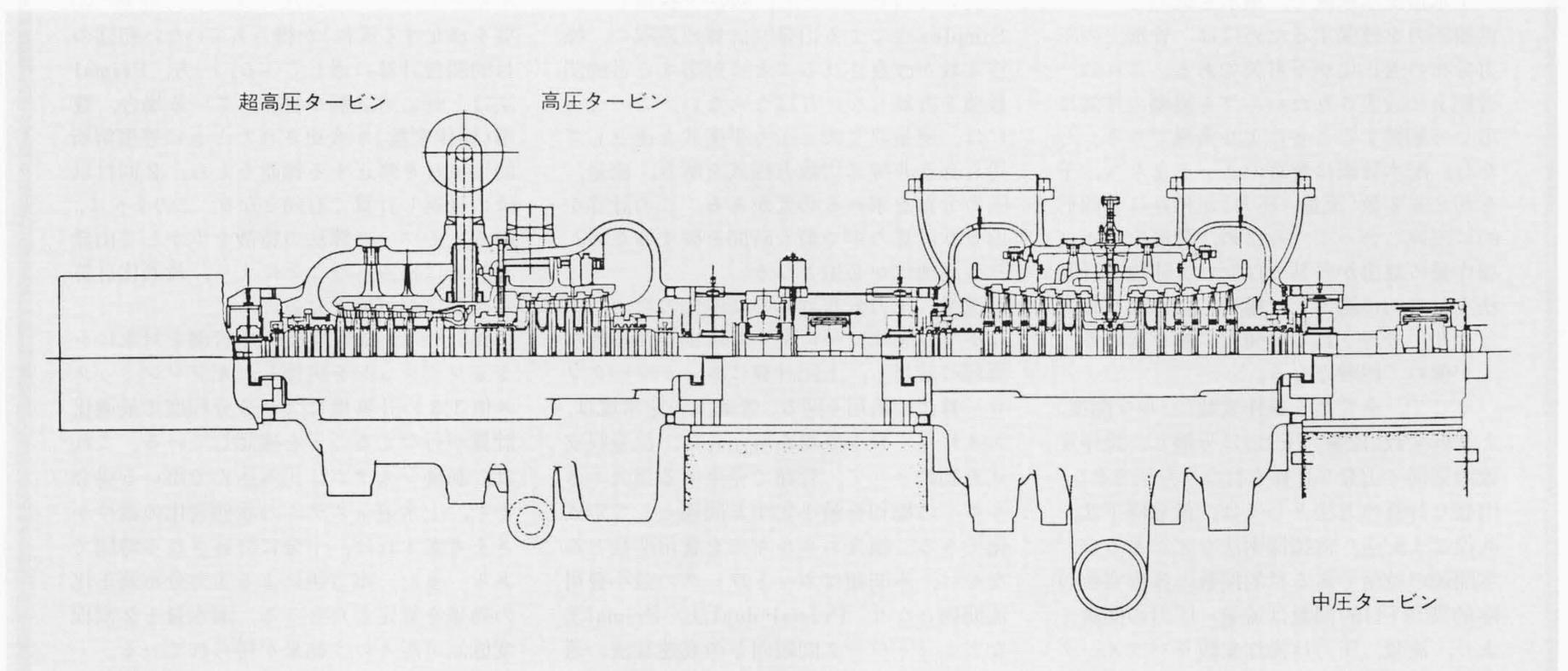


図12 超高温・高圧タービン計画断面図(ステップ2) 本図は、クロスコンパウンド形の1,000MWタービンの第1軸を示す。中圧タービン以降は、再熱圧力の適性化などによって既存の実績コンポーネントを採用している。また、改良形のI2Cr鋼の選定によって超高压及び高圧タービンの一体化によりコンパクト化を図っている。

ッキン間隙のアンバランスを改善する楕円形パッキンの採用によって十分に信頼性の高い対応ができる。

その他、タービン入口の主蒸気管伸びの逃し方、弁類弁棒の差圧増加に対応した駆動法など、きめの細かい検討が必要である。

以上、構造上の技術課題の検討結果と、前章の改良形の12Cr鋼をベースとする主要部の材料選定によれば、出力1,000 MW、蒸気条件316atg、593/566/566℃の超高温・高圧蒸気タービンの構造は、図12に示すものになると予想される。同図には、593℃用蒸気タービンとしての開発要素の大半が集約されているプライマリ軸、すなわち、超高圧-高圧タービンと中圧タービンが示されている。

材料選定の基本的考え方を基に材料開発の見通しを立て、その結果定めた材料の593℃での目標強度が、現行材料の現行温度での強度レベルを確保可能としている。そのために、図12のタービンは超高圧タービンの外部ケーシングの肉厚が目立つ以外に、在来のこの種タービンと大きく変わったところはない。

また、図12の超高圧セクションは、改良形12Cr鋼をベースとする材料の選定の結果、超高圧タービンと高圧タービンを一体とするコンパクトな構成を可能とし、かつ特別な冷却を必要としない構造となっている。

5 結 言

593℃級の温度に対応できる材料開発を軸に、超高温・高圧蒸気タービンの技術開発について紹介した。先行ユニットの実績があるとはいえユニット規模には大きな差があり、機器の十分な運用信頼性を確保するには、在来のユニット以上に

信頼性向上要因が付加されていることが必要であろう。

本報告では、この観点から当該タービンの技術開発を、耐熱材料と冷却技術との相互補完によって在来の機器の信頼性レベルを達成する、という思想ではなく、耐熱材料だけでこれを達成することを主眼としており、冷却技術は超高温・高圧大容量蒸気タービンといった未知の分野に対するハンディを補完するものとして考えている。

このためには、新耐熱材料の開発に対しては過酷な要求となるが、ベースとなる材料が現行の蒸気タービンで広範囲に実用化されている材料であり、かつこの系統の材料の耐熱強度の改善実績から、ベース材料の目標強度への改善は可能である。

以上、超高温・高圧蒸気タービンとしてステップ2に位置づけされる蒸気条件316atg、593/566/566℃の蒸気タービンの技術開発について概説した。高度の信頼性をもつこの種蒸気タービンを可能な限り早期に実現し、省資源、省エネルギーに資するため、今後いっそうの開発研究の促進を図りたいと考えている。

参考文献

- 1) 二宮, 外: 超高温・高圧蒸気発電プラントの技術展望, 日立評論, 63, 7, 455~460(昭56-7)
- 2) J. H. Harlow: Observations Regarding Eddystone No. 1 - First Year of Operation of 5,000psig, and 1,150 °F Combustion, Jan. 1962, etc.
- 3) 飯島, 外: 鉄基超合金の高温特性に及ぼすTi量の影響, 第29期第1回高温強度部門委員会報告, 京都大学会館, (昭和56. 1. 9)

論文抄録

ネットワークフロー理論の応用による大規模配水システムの圧力最適化法

日立製作所 宮岡伸一郎・船橋誠寿

電気学会論文誌 102-C, 3, 59~66 (昭57-3)

上水道配水システムで、漏水を低減し、かつ供給圧力を確保するためには、管網上の圧力分布の適正化が不可欠である。これは、管網上に設置されたバルブを需要の増減に応じて制御することにより実現できる。しかし、配水管網は数百のノードをもち、千を超える変数(流量, 圧力)が相互に非線形的に関連し合っているため、最適なバルブ操作量の算出が容易ではない。非線形計画法を常套的に適用した場合、計算量が膨大となり、許容される時間内に解を求めることが極めて困難となる。

そこで、全変数を操作変数(バルブ開度)と制御変数(流量, 圧力)に分離し、操作変数の空間で山登り計算を行なう方法をとる。山登り計算の方法としては、最急降下法、共役こう配法、直接探索法などがあるが、本問題の特徴である目的関数と操作変数の陰的関係(目的関数は流量, 圧力の関数であり、流量, 圧力は操作変数をパラメータとして含む方程式系の解として得られる。)を考慮して、直接探索法のなかで最も効率

の良いと言われるSimplex法を採用した。Simplex法による山登り計算の過程で、操作変数が改良されることに対応する目的関数値を計算しなければならない。このためには、流量収支式と圧力平衡式を連立して得られる非線形代数方程式を解き、流量, 圧力分布を求める必要がある。この計算が山登り計算の中で最も時間を要するため、その高速化が必須となる。

流量, 圧力分布計算の高速化のため、ネットワークフローに関するエネルギー最小原理に着目し、上記計算にネットワークフロー算法の適用を図る。管網内の定常流は、エネルギー最小原理を用いれば、流量収支式を制約として、管路で発生する損失エネルギーの総和を最小化する問題として定式化できる。損失エネルギーを費用関数とみなせば、本問題はネットワークの最小費用流問題となり、Primal-dual法、Primal法などネットワーク問題向き的高速算法の適用が可能となる。Primal-dual法は、値0の流れから出発し需要を満足するまで流量

を積み上げていく算法であり、可能解(需要を満足する流れ)が得られていない初回の目的関数計算に適している。一方、Primal法は、既に可能解が得られている場合、費用(操作変数)が変更されたときに感度解析的に流れを修正する機能をもち、2回目以降の繰返し計算で有効となる。このように、両ネットワーク算法の特徴を生かして山登り計算に組み込むことにより、最適化計算の高速化が可能となる。

486ノードの大規模配水管網を対象にシミュレーションを実施し、ギブソンミックス値3.3の計算機により3分程度で最適化計算が行なえることを確認している。これは、制御システムに組み込んで用いる場合でも、上水道システムの状態変化の緩やかさを考慮すれば、十分に許容される時間である。また、本方法による圧力分布適正化の効果を算定したところ、漏水量を2割程度低減可能という結果が得られている。