

蒸気タービンのDSS化設計

Steam Turbine Design Features for DSS Operation

最近の火力プラントでは、単機容量の大小と燃料のいかんを問わずDSS運用を主体とした高頻度の起動・停止に耐えられるような、耐久力向上形の設計が要求されるようになってきている。これは、原子力プラントの発電比率が増加してきたために、火力プラントによる日負荷調節が余儀なくされてきたことによる。

日立製作所では、これまでに多数のDSS運用機を納入しており、それらの運転経過も良好である。本論文では、これらの実績機の例を通して現状のDSS機設計技術を述べるとともに、将来の大容量蒸気タービンの耐力向上技術について述べる。

柏原克人* *Katsuto Kashiwahara*
 桑島英純* *Hidesumi Kuwashima*
 森谷新一* *Shin'ichi Moriya*
 花岡 浩** *Hiroshi Hanaoka*

1 緒言

近年、原子力発電プラントの増加に伴って、火力発電プラントによる日負荷調節運転が一般に行われるようになってきた。その結果、700MW級以下の火力発電プラントではDSS (Daily Start Stop)運用を主体とした高頻度起動・停止運転が行える耐力向上形設計機器が要求されるようになってきている。また、折からの燃料コストの安定傾向もあり、DSS運用プラントでも石炭専焼とするケースが多くなってきたため、タービンバイパスシステムなど国内プラントではこれまでは採用されていなかった技術も、今後のプラントでは必要となってゆくものと予想される。

本稿では、DSS運用に適した耐力向上形蒸気タービンの技術的特徴について述べ、関係者の参考に供したい。

2 DSS運用機の納入実績

日立製作所では、DSS運用向けの技術を以前から実機へ適用してきているが、これらは主に輸出向けの機械であった。ところが、最近の国内大容量蒸気タービンでもDSS運用を設計条件とする機械が増加してきている。表1に日立製作所が納入、及び製造中のDSS運用機のリストを示す。同表に見るように、最近のDSS運用機では500~700MW級の大容量機になっている点と、石炭燃焼プラントへも適用している点に特徴がある。石炭燃焼プラントの場合には、ボイラの急速な起動・停止が困難なので、タービンバイパス装置を設けて蒸気タービンだけを急速起動・停止できるように考慮が払われている。

DSS運用機の最大の特徴は、早朝に起動して、朝の電力量

表1 DSS運用機の納入実績 国内向けDSS(Daily Start Stop)運用機の実績も出てきた。最近の傾向として大容量化と燃料の多様化がみられる。

No.	納入先	ユニット名	出力 (MW)	タービン形式	回転数 (rpm)	蒸気条件 (ゲージ圧kgf/cm ² -°C/°C)	燃料	運開年 (西暦)	備考
1	パキスタン	ピプリNo.1~2	210×2	TCDF-26	3,000	141.8-525/525	LNG, 重油	1984	タービンバイパス付き
2	シンガポール	セノコNo.4~7	250×5	TCDF-33.5	3,000	169-538/538	重油	(No.4~6)1979 (No.7~8)1983	—
3	オーストラリア	タロンNo.1~4	350×4	TCDF-33.5	3,000	169-538/538	石炭	1984~1987	タービンバイパス付き
4	オーストラリア	カライドNo.1~2	350×2	TCDF-33.5	3,000	169-538/538	石炭	1988~1989	タービンバイパス付き
5	オーストラリア	スタンウェルNo.1~4	350×4	TCDF-33.5	3,000	169-538/538	石炭	1990~1993	タービンバイパス付き
6	関西電力株式会社	相生No.3	375	TC4F-30	3,600	169-566/538	原油	1983	—
7	オーストラリア	ロイヤングNo.1~4	500×4	TCDF-40	3,000	166.2-538/538	石炭	1992~1995	タービンバイパス付き
8	関西電力株式会社	御坊No.2	600	TC4F-33.5	3,600	246-538/538	重油, 原油	1984	—
9	A社	—	600	TC4F-33.5	3,600	246-538/566	LNG	1990	—
10	九州電力株式会社	松浦No.1	700	TC4F-33.5	3,600	246-538/566	石炭	1989	タービンバイパス付き

注：略語説明 LNG(液化天然ガス)

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所電力技術本部

ピークに対応できることであるが、夜間は電力が余るのでプラントを停止して、翌朝の起動に備えることになる。したがって、発電設備の各機器にとっては、短時間で起動し全負荷運転に到達するという運転パターンを毎朝繰り返し行えるように、耐力向上形の設計が要求されることになる。

DSS運用の一例として、関西電力株式会社御坊発電所第2号機600MW機の運転実績を示すと次のようである。

(1) 蒸気タービンはTC4F-33.5(3車室)形で、蒸気条件はゲージ圧246kgf/cm²-538/538℃で、重・原油燃焼の貫流ボイラで発生した蒸気によって運転する。図1に蒸気タービンの構造を示す。

(2) 運用条件は、DSS運用で、深夜停止後起動を100分(目標90分)で、週末停止後起動を180分で終了するように計画されている。また、機器の耐用年数間の起動回数は、深夜停止後

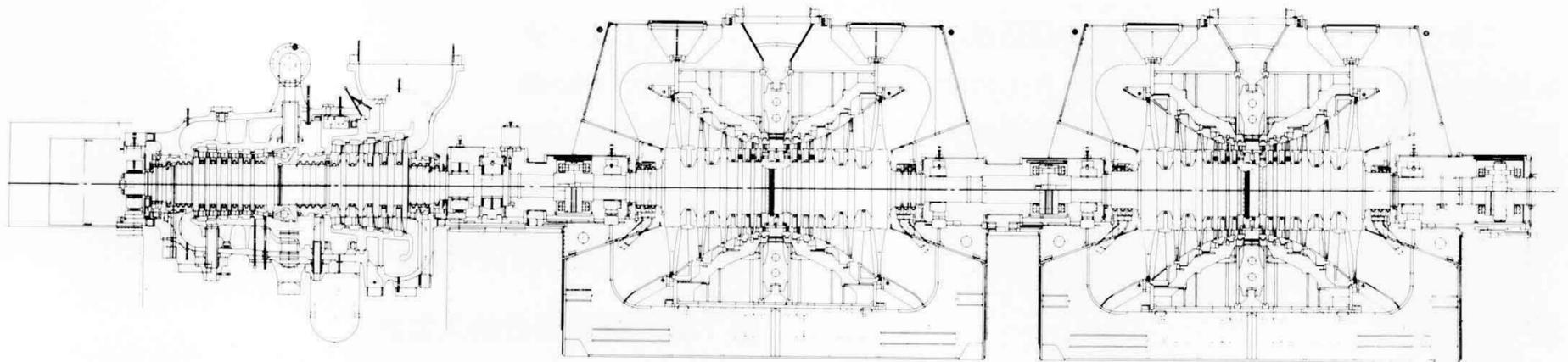


図1 600MW級DSS運用蒸気タービンの一例 DSS(Daily Start Stop)運用機には、コンパクトで運転しやすいことが要求されるが、大容量のものについては高中圧部を一体とした3車室形タービンが最適である。

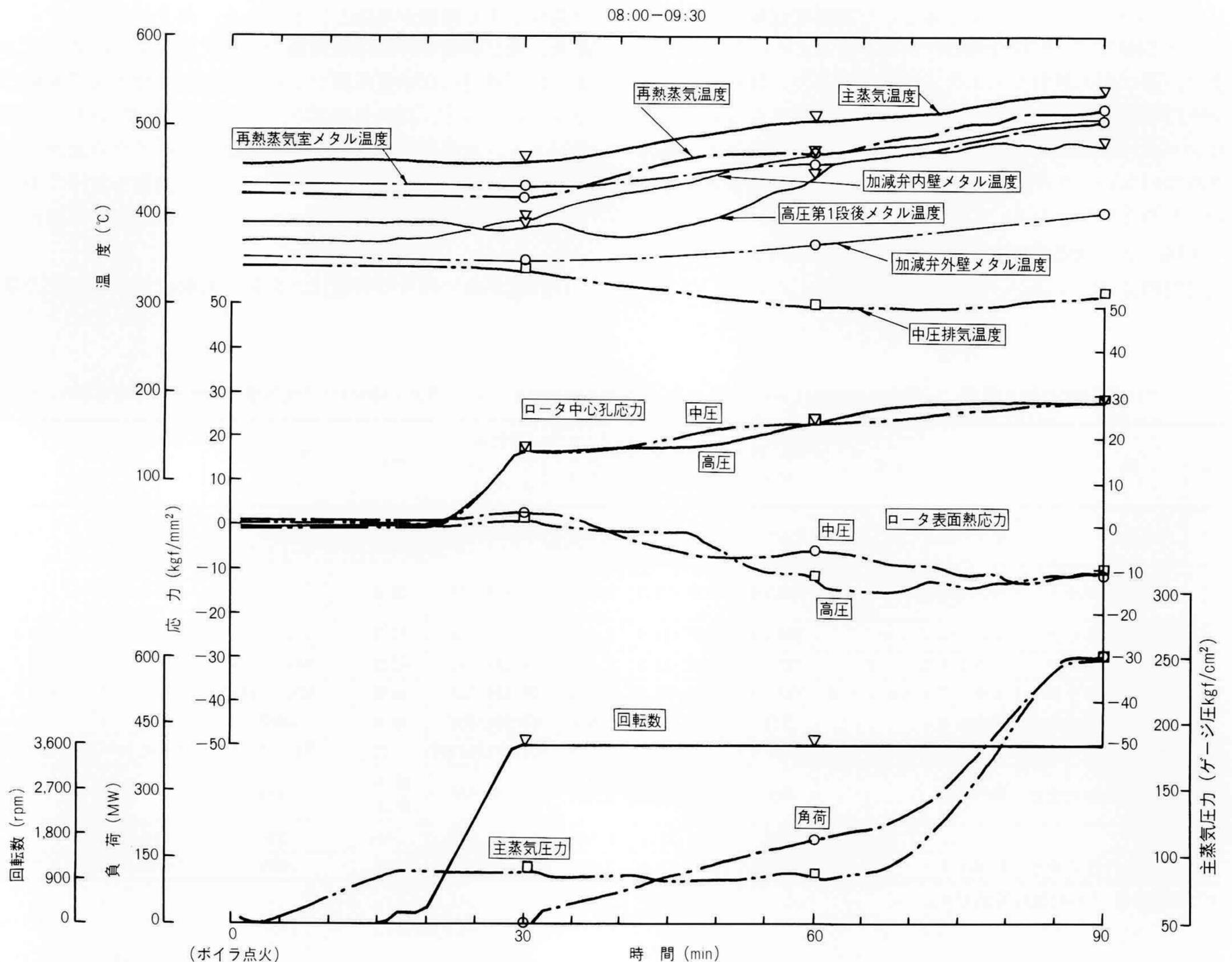


図2 600MW級DSS運用機の深夜停止(11時間)後起動例 ボイラ点火から全負荷までを90分で達成している。

起動を約5,500回、週末停止後起動を約1,130回と予定している。

(3) このような急速で頻繁な起動に耐えられるように、高中圧ロータは、素材製造段階での品質管理を強化した高じん(靱)性ロータ材にするとともに、円板付根部コーナ半径が大きく、ラビリンスクシ(櫛)歯をロータに切り込まない、いわゆるフラットロータ形状を高圧第2、3段及び中圧第1、2段のダイヤフラムパッキン部に適用して、起動時のロータ表面熱応力を軽減している。また、コンバインドガバニング方式を採用して、起動の初期を全周噴射運転することによって、通気時の高圧初段後温度を高めて、起動時のロータ表面温度変化幅の削減も行っている。更に、主蒸気止め弁、加減弁及び高圧車室の材料は、化学成分調節と熱処理の強化によってじん性を増加させたCr(クロム)-Mo(モリブデン)-V(バナジウム) 鋼を採用している。なお、実際の起動によって発生したロータの寿命消費量は、HITASSシステム⁷⁾で自動積算管理するようになっている。

(4) このように計画された600MW機の実機での起動は、**図2**に示すように深夜停止(11時間)後の起動を90分で行っており、目標起動時間を満足している。同図に示すように、主蒸気及び再熱蒸気温度制御が順調に行われており、ロータ寿命消費が起こるような熱応力は発生していない。また、本機の週末停止(32時間)後起動時の実績では160分で起動しており計画値よりも短い時間となっていたが、この場合もロータ寿命消費は生じていない。

このように、現状技術によっても十分に信頼性の高い大容量DSS運用機の設計製作が可能であるが、今後、更に大容量化したDSS運用機が要求されることが考えられるので、よりいっそうの耐力向上技術の開発が必要となってくる。

3 DSS運用蒸気タービンの新技術

3.1 タービン構造と材料技術

DSS運用に適したタービン構造としては、急速起動時に伸び差が小さく、軸振動が低く、熱応力が発生しにくいものが理想的である。一方、DSS運用機の単機容量は現状では700MW級まで増加し、更には米国の例に見るように800MW級まで増加することが考えられる。しかし、このような大容量機となっても高い効率レベルを維持するために、蒸気条件はゲージ圧246kgf/cm²-538/566℃とするのが望ましいので、これらの条件に適した構造と材料の選択が肝要である。このために必要となる耐力向上技術は次のとおりである。

(1) 高中圧一体構造

700MW級蒸気タービン²⁾を例に、高圧-中圧部の構造の比較を**図3**に示す。DSS運用機としては前述のように、起動時の伸び差が小さく、軸振動が低く、熱応力が発生しにくい構造が理想なので、高圧・中圧別体で、かつ複流高圧初段を採用したベースロード負荷機に対して次のような構造改善が必要となる。すなわち、同図の「改善-1」では、高圧-中圧が別体ではあるが、高圧初段を単流として構造の単純化を図るとともに、若干ではあるが軸長さを短縮した構造としている。この構造では、更に高圧内・外部車室径を小さく肉厚を薄く

できるので、熱応力の軽減が図られる。また、「改善-2」になると、高中圧一体構造となり、DSS運用機として最適の構造となる。この構造では中圧部が単流となるために、ロータ強度上の配慮が必要であるが、最近では後述のように、高温クリープ強度の高い改良12Crロータ材が開発されており、700MW級の高中圧一体形タービンの設計が可能となっている。

(2) 高圧初段ノズルの耐摩耗処理³⁾

通常、DSS運用機では変圧運転を行っているので、起動時にボイラ側から飛来する固形物による影響を受けにくい状況にあるが、起動回数が多いので、固形物によるノズルエロージョン対策を十分に行う必要がある。日立製作所ではこの目的のために、各種の耐摩耗処理法について比較検討した結果、Crパック処理を行ってノズル出口部の表面を硬化させる方法を採用している。この方法では、高圧初段ノズルが微細な固形物によってエロージョンを受けやすい出口部の腹側表面にまず浸炭処理を行い、続いてクロム粉末と塩化アンモニア粉末を混合したパック剤に浸して、1,000℃以上の高温に熱しノズル表面にCrリッチな薄い層を形成させる。この処理表面は600℃の高温で、未処理面の約4倍の硬さを維持し、かつ固形物の衝突に対して疲労強度が高く、優れた耐摩耗特性を発揮する。**図4**に固形物によるノズルエロージョン試験結果を示す。

この試験は、実プラントのタービン上流側から収集した微細固形物を用いて、高圧初段ノズルの運転温度(=538℃)と流速に合うように調節した熱風に乗せてノズル表面に一定時間衝突させて、ノズルスロートの増加率を測定したものである。同図中にはCrパック処理ノズルとホウ化処理ノズルの試験結果を示しているが、Crパック処理のほうがスロート増加率が少なく、耐摩耗特性が優れていることが分かる。

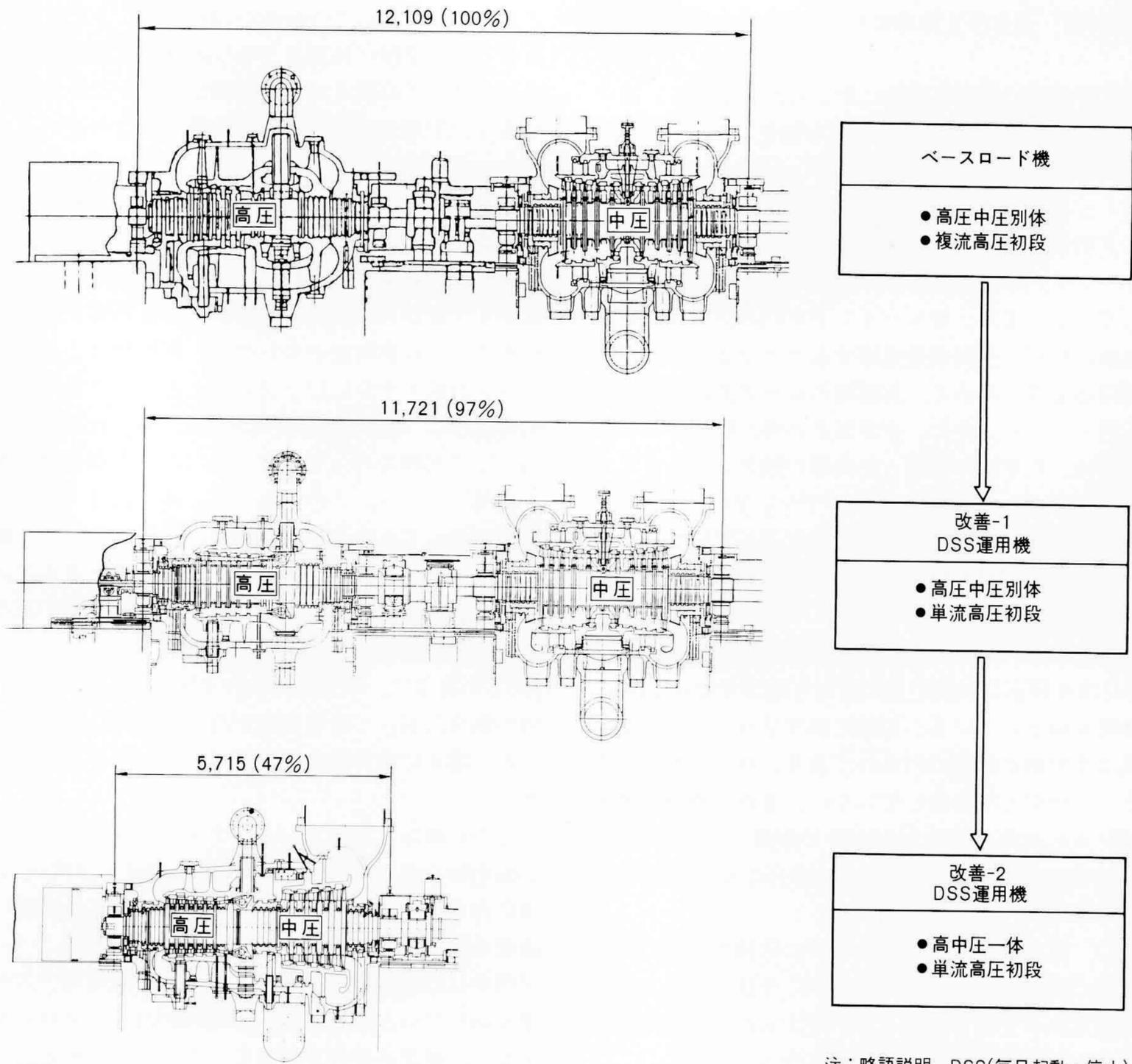
この試験結果から変圧運転を行う1~3弁全開状態で比較すると、従来の未処理ノズルに対し約9倍の寿命延長が期待できることが確認できた。なお、Crパック処理を行った耐摩耗高圧初段ノズルは、既に600~1,000MW実機に適用し良好に運転されている。

(3) 鍛造式主蒸気止め弁と加減弁

起動・停止が頻繁に行われることによって、主蒸気止め弁と加減弁に加わる熱履歴も当然のことながら増加する。これらの弁は形状が複雑で、かつ大形であることから従来から鍛造で製造しているが、長年の運転中には材料の劣化が進むことが考えられるので、最近では鍛造素材を用いた主蒸気止め弁と加減弁も採用されるようになってきている。鍛造弁では、鍛造弁に比較して材料の信頼性が一段と向上するため、DSS運用機に最適である。日立製作所では既に1,000MW機に鍛造弁を適用済みであるが、今後これを採用する機械が増加してくるものと考えられる。

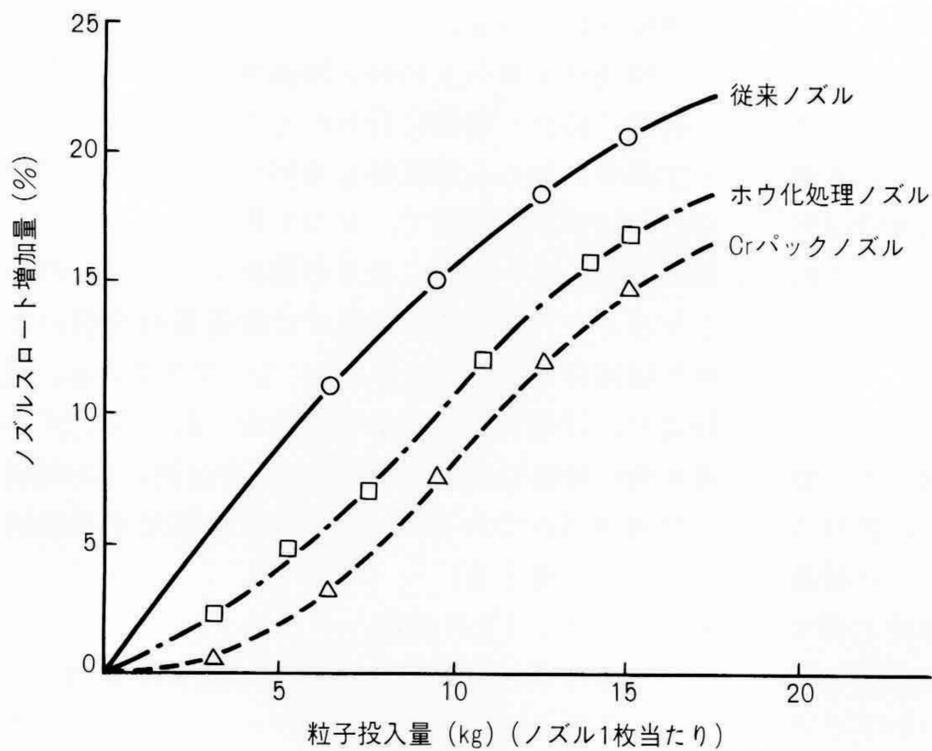
(4) B(ボロン)入り鋼ケーシング材⁴⁾

日立製作所で、Cr-Mo-V鋼の化学成分調節と熱処理強化によってじん性向上を図ったケーシング材を従来から使用していることは前述した。最近では、少量のBをCr-Mo-V鋼に添加して高温クリープ強度を著しく改善した鋼材が開発されており、このケーシング材を採用することによって、主

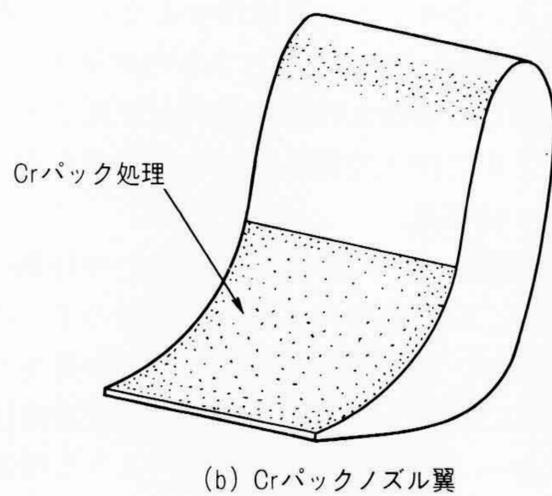


注：略語説明 DSS(毎日起動・停止)

図3 700MW級の高圧・中圧部構造 大容量機となっても、DSS運用機は高中圧一体構造のタービンが望ましいので、高圧中圧部の改善が今後の課題である。



(a) ノズル翼の耐エロージョン性(実験結果)



(b) Crパックノズル翼

図4 高圧初段翼の耐摩耗処理技術 Cr(クロム)パック処理を施したノズル表面は、耐摩耗性が高くかつ疲れ強さがあるので、高圧初段ノズルの耐力向上に最適である。

蒸気止め弁、加減弁、ノズルボックス、高圧内部車室などの耐力向上を図ることが可能となる。

B入り鋳鋼材は、昭和50年ごろ初めて1,000MW用主蒸気止め弁と加減弁の弁体に使用したが、製造性の改善を図るためその後研究試作を繰り返した結果、Al(アルミニウム)及びTi(チタン)成分を適正に調整することによって安定した特性を発揮できることが分かり、信頼性の高い鋳鋼材料として一般に使用されている。すなわち、日立製作所が開発したB入り鋳鋼の化学成分は、1.28%Cr-1.05%Mo-0.28%Vの主成分に0.0013%のBと、0.043%のAlを添加したもので、その高温クリープ強度は図5に示すように、538°Cで従来のCr-Mo-V鋳鋼より約70%も高い。

日立製作所では、このB入りCr-Mo-V鋳鋼を既に1,000MW用ノズルボックスに適用しているだけでなく、1,000MW級用主蒸気止め弁を鍛造で試作し、製造性の確立と信頼性確認試験を実施済みである。図6にB入りCr-Mo-V鋳・鍛鋼材で製造したノズルボックスと主蒸気止め弁を示す。

(5) 改良12Crロータ材⁴⁾

566°C以上の蒸気温度に対しては、12Crロータ材を用いるが、高中圧一体構造としたタービンでは、再熱蒸気が566°Cとなると高中圧ロータ全体が12Crロータとなる。ところで、前述のように将来の700MW級DSS運用機には高中圧一体構造のタービンが可能であるが、この大容量機の高中圧ロータの信頼性向上策として、日立製作所では改良12Crロータ材を開発している。このロータ材は、従来の12Crロータ材の化学成分の

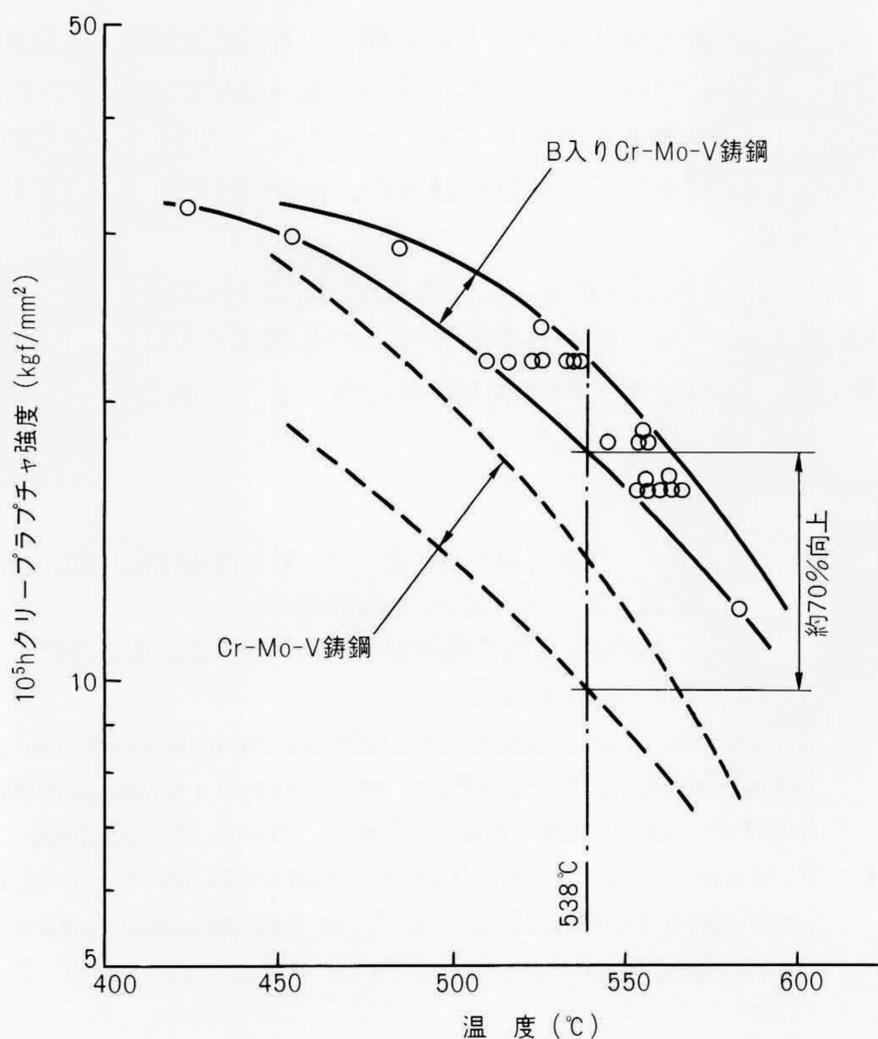
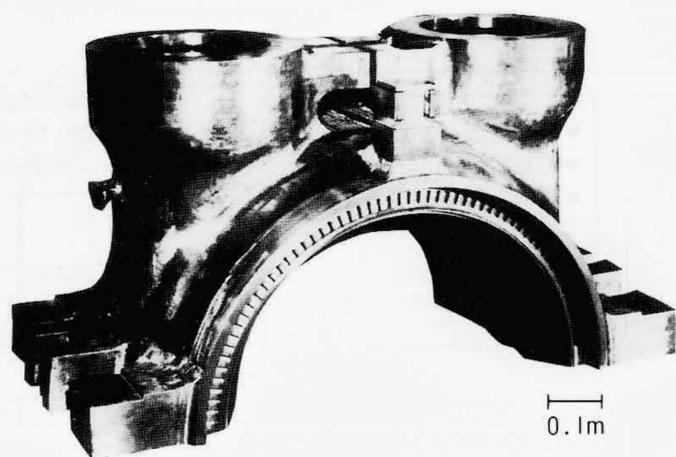
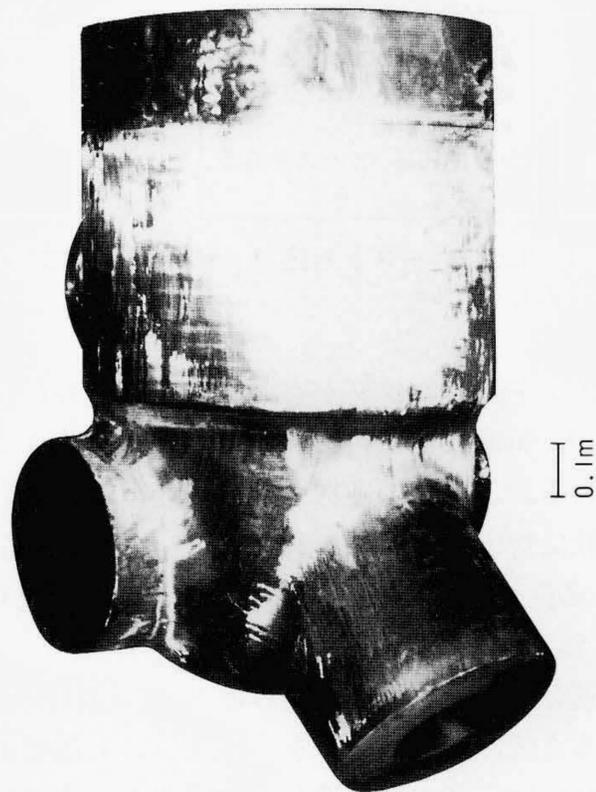


図5 B入りCr-Mo-V鋳鋼の高温クリープ強度 従来のCr-Mo(モリブデン)-V(バナジウム)鋳鋼にB(ボロン)とAl(アルミニウム)を添付した鋳鋼材は高温クリープ強度が高く、主弁ボデー、ノズルボックス、高圧車室などの耐力向上に適している。



(a) 1,000MW実機用ノズルボックスに適用したB入りCr-Mo-V鋳鋼材



(b) 1,000MW用主蒸気止め弁試作に適用したB入りCr-Mo-V鍛鋼材

図6 B入りCr-Mo-V鋳・鍛鋼材の適用例 B入り鋳・鍛鋼材の実機への適用は、1,000MW用ノズルボックスをはじめとし、超々臨界圧試験タービンの外部車室、1,000MW用鍛造弁の試作などで行っている。

MoとVとNb(ニオブ)の量を調節し、W(タングステン)を0.3%添加することによって、566°Cの高温クリープ強度(10⁵時間)を、従来材よりも約20%向上させたものである。この高温クリープ強度向上によって、大容量機の高中圧一体構造の信頼性は一段と向上することとなる。

(6) 改良12Cr動翼材⁵⁾

12Crロータ材の改良と同時に、動翼材の改良も実施した。従来500°C以上の段落に使用していた12Cr-Mo-Nb-V動翼材の化学成分のVとNbを若干減少させて、Wを0.3%添加することによって、566°Cの高温クリープ強度(10⁵時間)を従来材よりも約50%向上させることができた。この改良動翼材も大容量DSS運用機の耐力向上に有効である。

3.2 制御・運転管理技術

DSSプラントとしての運用上のニーズと対応を図7に示す。火力の負荷運用に対するニーズは、将来ますます高度化するものと考えられる。例えば、起動時間短縮や高負荷変化率といった負荷追従性能と、定常運転での高効率化を両立させるために、ノズル締切り调速方式と絞り调速方式を組み合わせ

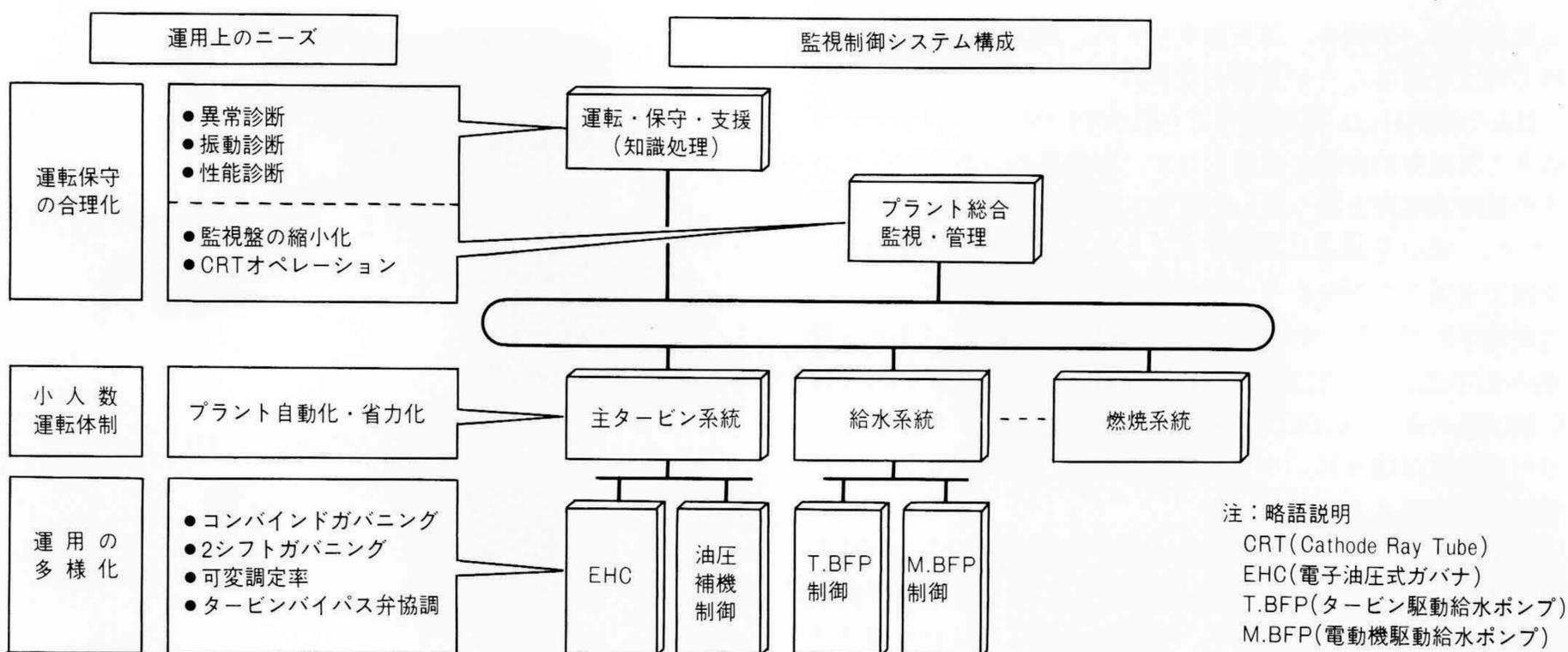


図7 運転制御上のニーズと対応 小人数運転，運用の多様化などの将来ニーズに応じられるシステムとするために，知識処理などの新しい手法の導入を計画している。

たコンバインドガバニングが有効であり，現在広く採用してきているが，将来は更に可変調定率などの採用もニーズとして考えられる。これらの多様かつ高度な運用に対して，将来も含め柔軟に対応するためには，デジタル式EHC(電子油圧式ガバナ)の採用が極めて効果的であるばかりでなく必ず(須)と言えよう。

一方，運転特性という面からみると，運転員の小人数化の動向を踏まえて，起動・停止を含むプラント通常運転の自動化が図られほぼ完成の域に達したと言える。現在はプラント異常の早期発見，あるいは異常発生時の原因把握及び対応操作に対するガイドシステムが要望されており，タービンプラントとしても，振動診断，性能診断などの設備診断のほか，異常時ガイドシステムが採用されてきている。これら診断や運転ガイドのためには，設計上のノウハウとともに機器固有の特性を踏まえた運転ノウハウが重要であり，それらのノウハウを運転員が容易に追加できる手段として知識工学の適用が検討されている。

3.3 タービンバイパス装置⁶⁾

最近，DSS運用機でも石炭専焼のプラントが多くなってきている。石炭専焼プラントでは，運炭装置や石炭燃焼装置など数多くの装置類が連結して運転されているので，急速な起動・停止操作をプラント全体で実施することは現実的でない。タービンバイパス装置を用いて，蒸気タービン，発電機だけを急速起動・停止させる運転が行われる。

このような運転法は，以前から輸出機では採用されており実績も出ているが，国内機ではまだ実施例は少ない。しかし，最近のように石炭が低コストで入手できる状況であれば，国内でも石炭専焼プラントでのDSS運用が増加してゆくものと予想される。

日立製作所のタービンバイパス装置の特徴としては，100%容量のバイパス能力による所内単独運転を可能としていること，ならびに大口径のベンチレータ弁を用いた高圧部の真空運転が可能なので，起動時の高圧排気温度上昇が低く抑え

られるという点がある。

この系統構成によるタービンバイパス装置は，日立製作所の石炭燃焼DSS運用機に適用し良好な運転特性を得ている。一例として，210MW機の深夜停止後起動の実績では，タービンスタートから44.6分で全負荷に到達し，タービンバイパス運転中の高圧排気温度は $291 \pm 10^{\circ}\text{C}$ と低く維持されていた。また，ロータの寿命消費率も無視できる程度であった。

4 結 言

DSS運用機の現状技術による実績と，将来機のための耐力向上新技術について紹介した。国内でも火力発電プラントのDSS運用はますます増加してゆくとともに，大容量化の傾向と石炭専焼プラントでのDSS運用が，近い将来必要とされると考える。

このような状況を踏まえて，今後，最新技術だけでなくDSS運用蒸気タービン特有の技術についても幅広く検討を加え，将来の電力ユーザーの要求を満足できるように努力したい。

参考文献

- 1) 天日，外：ロータ熱応力制御によるタービン自動制御装置，火力原子力発電，29，5，473～482(昭53-5)
- 2) 柏原，外：700MW級高性能蒸気タービン発電機，日立評論，67，2，109～114(昭60-2)
- 3) R.Kaneko, et al.: Design of Turbines for Improved Coal-Fired Plants, EPRI-the First International Conference on Improved Coal-Fired Power Plants, Nov., 19～21(1986)
- 4) K.Iijima, et al.: Steam Turbine Materials for Improved Coal-Fired Plants, EPRI-the First International Conference on Improved Coal-Fired Power Plants, Nov., 19～21(1986)
- 5) 久野，外：超高温・高圧蒸気タービン，日立評論，64，10，757～762(昭57-10)
- 6) Y.Amano, et al.: Features of 350MW Steam Turbine and Generator, Hitachi Review, 32，6，309～314(1983-6)