

日立コンパクト蒸気タービンの開発

Development of Hitachi Compact Steam Turbine

火力発電所建設費は年々増大しつつあるが、これに対処するため低建設費、及び短納期発電プラントの検討が行なわれている。日立製作所は、これらの要求を満たすべく画期的な125～150MWコンパクト蒸気タービンを開発した。日立コンパクト蒸気タービンは復水器を横置形とし、タービン発電機架台を低床化させ、運転操作、保守が容易にできるようにシングル スパンとし、低圧部は対向流形としてスラスト力をバランスさせ信頼性を向上させたN形排気室が採用されている。本タービンは完全一体輸送が可能であり、タービン建屋の容積は125MW標準発電プラントの約20%であるので、蒸気タービンとガスタービンのコンバインド サイクル プラント、一般火力発電プラント用などに最適である。

滝 孝光* Taki Takamitsu
安ヶ平紀雄** Yasugahira Norio
名 村 清** Namura Kiyoshi

1 緒 言

近年大容量ガスタービンが実用化されてきたが¹⁾、まだ高いエネルギーを持っているガスタービン排気温度を利用して、これで回収ボイラで蒸気を発生させ、蒸気タービンを駆動して発電する蒸気タービンと、ガスタービン コンバインド サイクル プラントを計画する気運にある。このため、短納期でコンパクトな蒸気タービンの開発が急務となってきた。一方、年々人件費、建設資材などの高騰に対処するため、低建設費及び短納期の火力発電プラントの検討の必要に迫られ、日立製作所でもコンパクト蒸気タービン プラントの開発が展開され、これらのプラント向けに開発されたコンパクトで短

納期の一般火力発電プラント用及び蒸気、ガスタービン コンバインド プラント用として開発した画期的な125～150MW日立コンパクト蒸気タービンの成果について報告する。

2 日立コンパクト プラントの概要

日立コンパクト プラントは次の目標を達成するため開発を展開した。

- (1) 標準機種の開発により、短納期で設計製作を可能とする。
- (2) 可能な限りブロック化して現地での据付期間の短縮を図る。
- (3) 発電所全体のコンパクト化を図る。

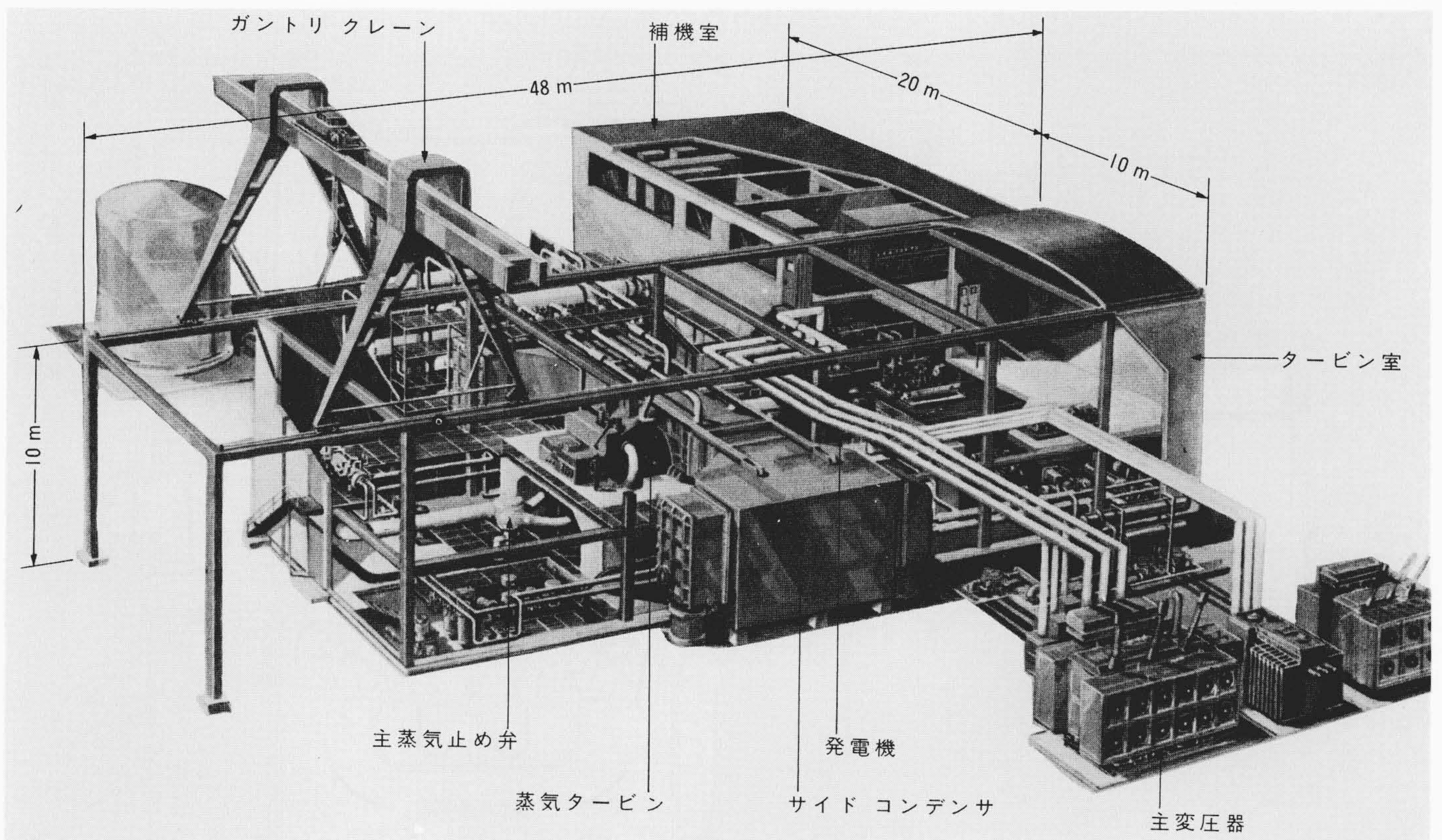


図1 日立コンパクト プラント全体配置図 図中に標準プラントの主要寸法を示す。

* 日立製作所日立工場 ** 日立製作所日立研究所

以上の目標に沿って開発された蒸気タービン、復水器、発電機、タービン建屋及び納期短縮についての開発成果を以下に概略記述する。図1は開発された日立コンパクトプラントの全体配置図を示す。

2.1 蒸気タービン

コンパクトプラント向け蒸気タービンに要求される点は、
(1) 早期発電開始と同期化するため短納期であること。
(2) 据付、保守の簡略化のためにタービン本体のコンパクト化
(3) 運転操作の省力化
であり、これらの要求にこたえるため復水器を横置形とした蒸気タービンを開発し、タービン発電機架台の低床化を実現した。

コンパクトプラント向け蒸気タービン仕様は、
出力：125～150MW
形式：DF-23N形

蒸気条件：88kg/cm²g-510°C

でありその特徴は、

- (1) 排気流が中央部に集中し排気損失が少なく、横置復水器と直結できる低圧排気室をN形排気室と呼び、これを採用した。
- (2) 2軸受（シングル スパン）の125～150MW非再熱タービン自体がコンパクト化されており、運転操作、保守が容易である。

図2にコンパクト蒸気タービンの断面図を、図3に蒸気タービンと復水器との取合正面図を示す。真空荷重による外力がタービン排気フランジ部に作用することを防ぐため、両側の復水器間をステーで連結している。

- (3) 軸スラスト力は低圧部が対向流であるため、バランスしてタービンの信頼性を向上させている。

- (4) タービン架台が低床式となったため、低圧抽気取出しはタービン上部より配管する。

- (5) N形排気室の開発により、図4に示すように125～150MW級蒸気タービンの完全一体輸送が可能となり、短納期かつ据付の合理化が可能となった。

2.2 コンパクト復水器

タービン架台を低床式としたため、コンパクト復水器は2胴横置形とし、1折流とした。

コンパクト復水器構造は、図3に示すように蒸気タービン排気口からの蒸気流がそのまま管渠に流入するように管を配列し、管渠内の蒸気流動抵抗を少なくしている。更に、脱気効果を良くするため、管渠下部にトレイを設けたり、タービンとの取合の連結胴で熱膨張を吸収するため、伸縮継手が設けられたりしている。

コンパクト復水器の特徴は、従来の復水器のようにタービン架台内での上部胴のパネル組立が不要なこと、及び蒸気タービンと関係なく、復水器全体が単独で据え付けられること、工場で全体組立後、一体輸送が可能であるため、据付工程が短縮できるなどである。

2.3 発電機

発電機はリード ブッシング上置にして床下寸法を縮小させ、低床式架台に合致させた。

2.4 タービン建屋

本コンパクトプラントでは、低床架台及び復水器、加熱器、天井クレーンの屋外配置などにより、タービン建屋を著しく小さくでき、建屋容積は図5に示すように125MW級標準火力発電プラントの約20%で十分な配置となっている。

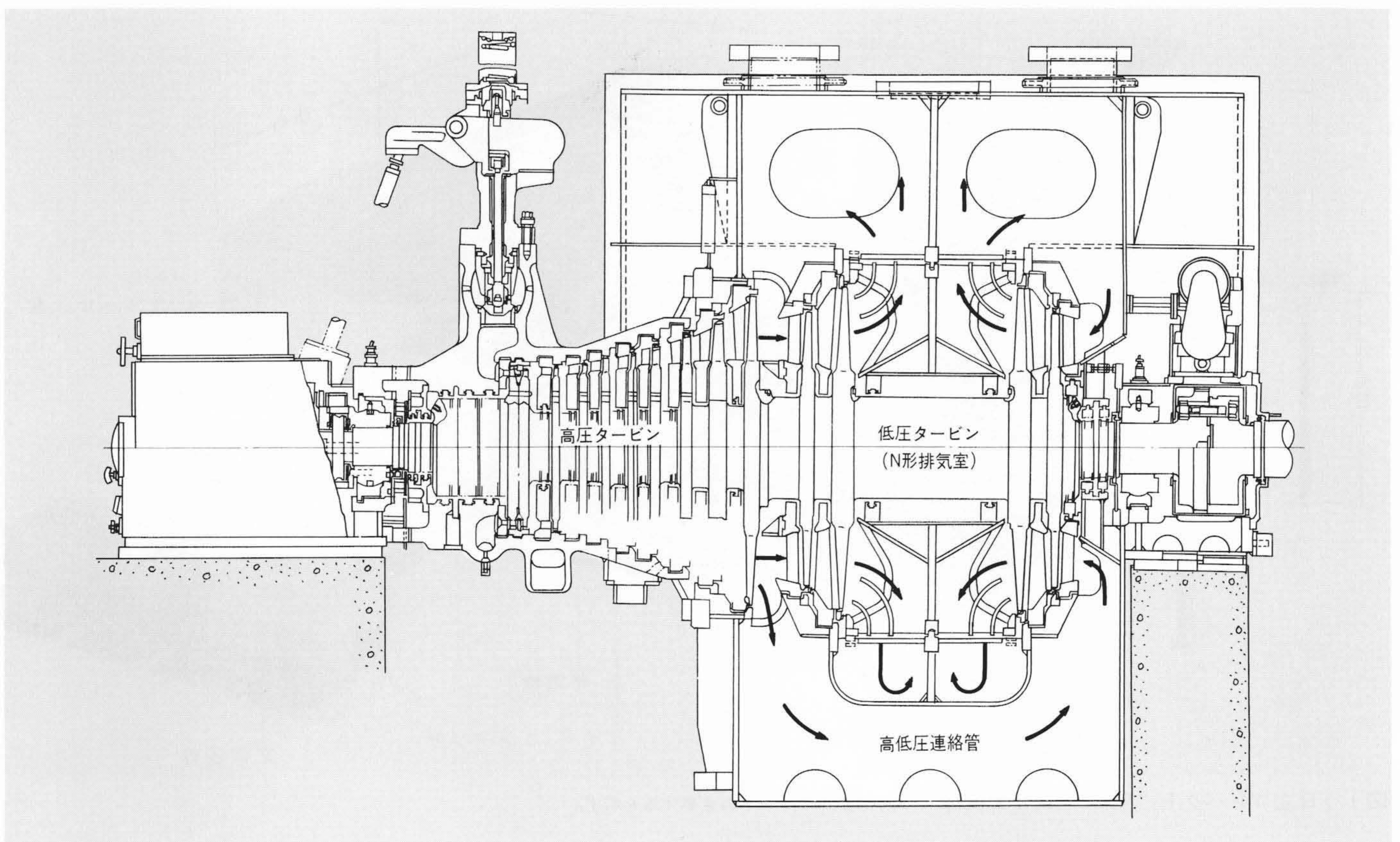


図2 日立コンパクト蒸気タービン断面図 高圧タービンは下側に配置され、対向流排気は上方へ流れる。

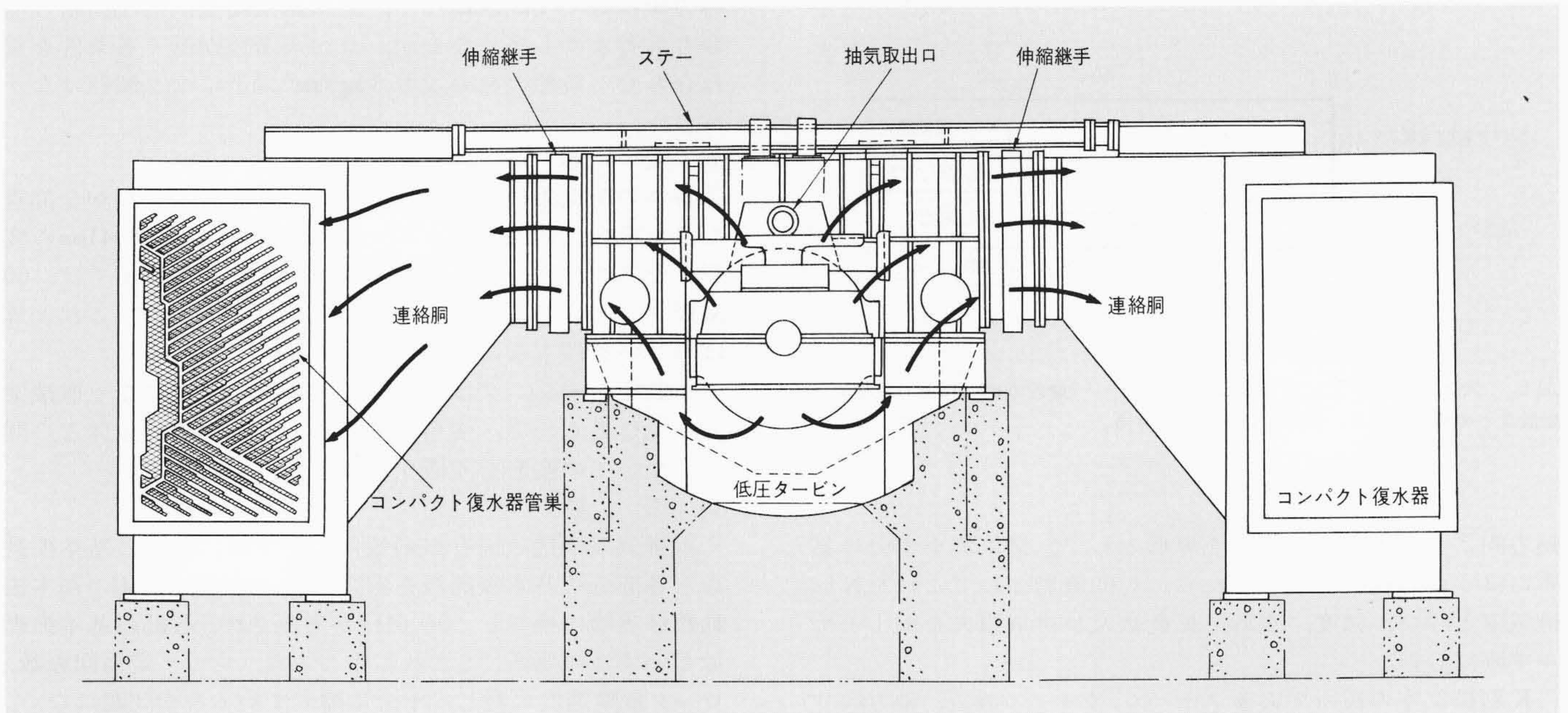


図3 蒸気タービンと復水器との取合正面図 連絡胴、復水器よりの真空荷重による外力をステーで受け、低圧ケーシング排気フランジ部には伸縮継手を設けている。

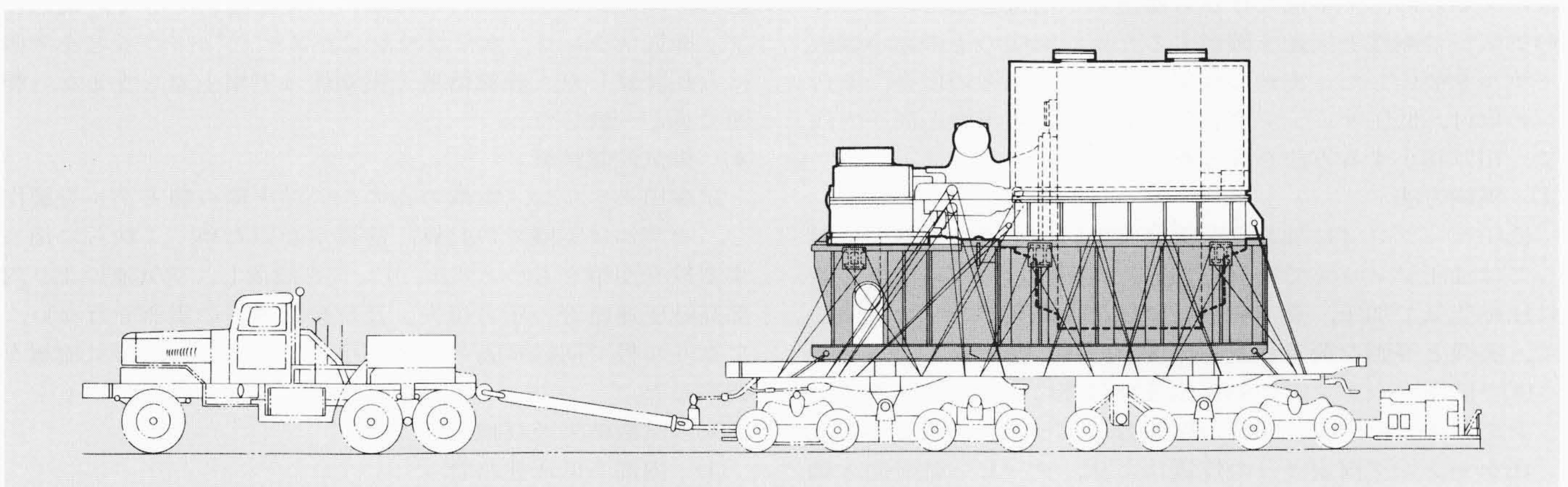


図4 コンパクト蒸気タービンの一体輸送 工場内で最適な作業条件下で全体組立され、トレーラで輸送できる。

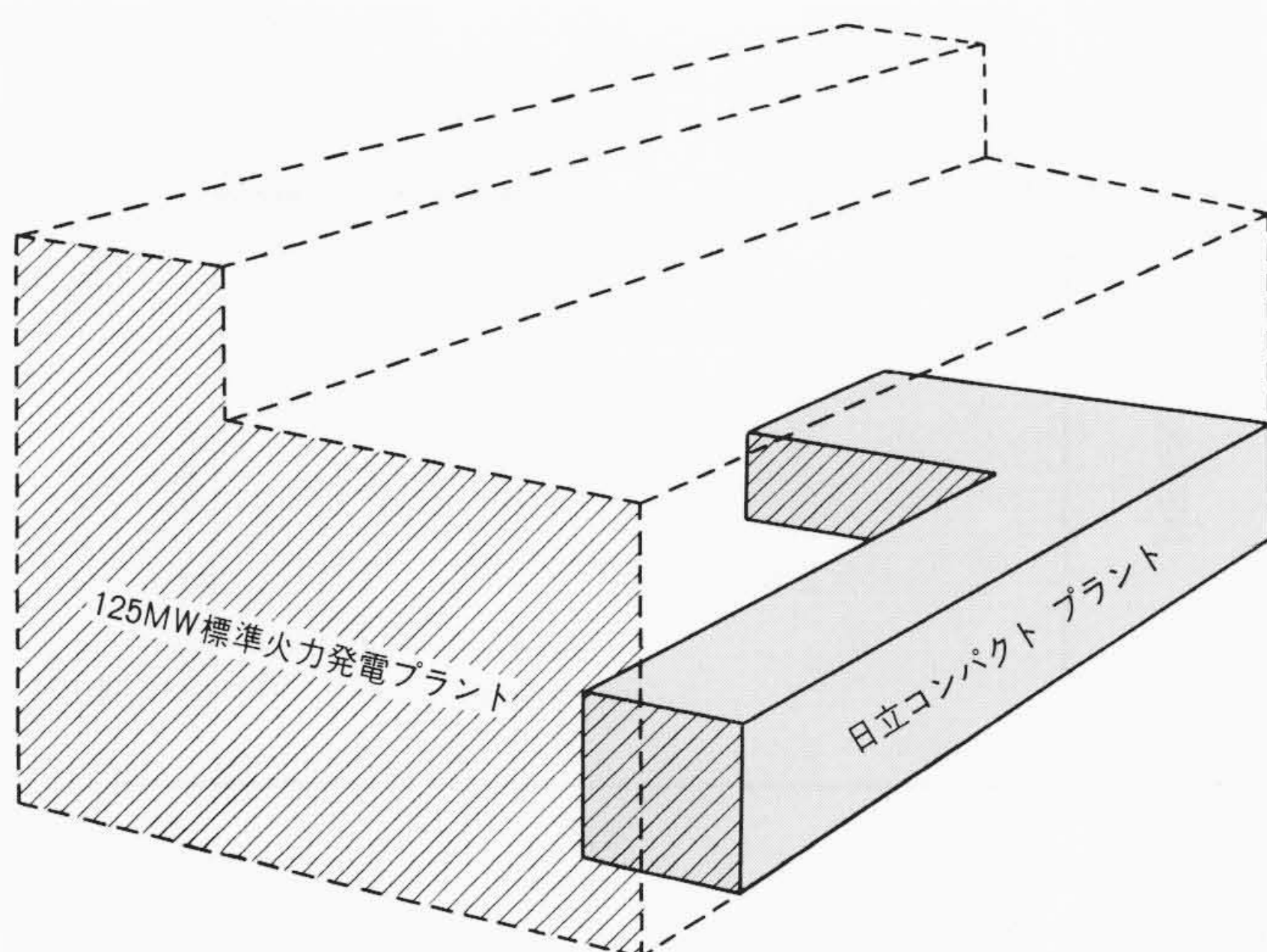


図5 タービン建屋の容積比較 低床架台及び横置復水器、加熱器、天井クレーンの屋外配置などによりタービン建屋を著しく小さくできる。

2.5 納期短縮

本コンパクトプラントの建設期間は、上述したように種々の機器の開発、配置などの検討により、図6に示すように従来の125MW級火力発電プラントの標準建設期間より19%短縮できる。

3 コンパクト蒸気タービンの開発

蒸気タービンをコンパクトにするため、特別に開発された排気流が中央部へ集中し、排気損失の少ないN形排気室（対向流両側排気）について次に詳述する。

3.1 排気室構造と強度及び振動

タービン排気室の構造は、排気方式が従来の下方排気(Down Exhaust)から両側排気(Side Exhaust)とした。

排気室は両側排気方式とし、かつコンパクトな構造にするため、従来のコンパクト排気室として納入実績のあるK形排気室（タービン側、発電機側最終段より排出される蒸気は排気室内で2分割されており、それぞれの排気は同一タービン

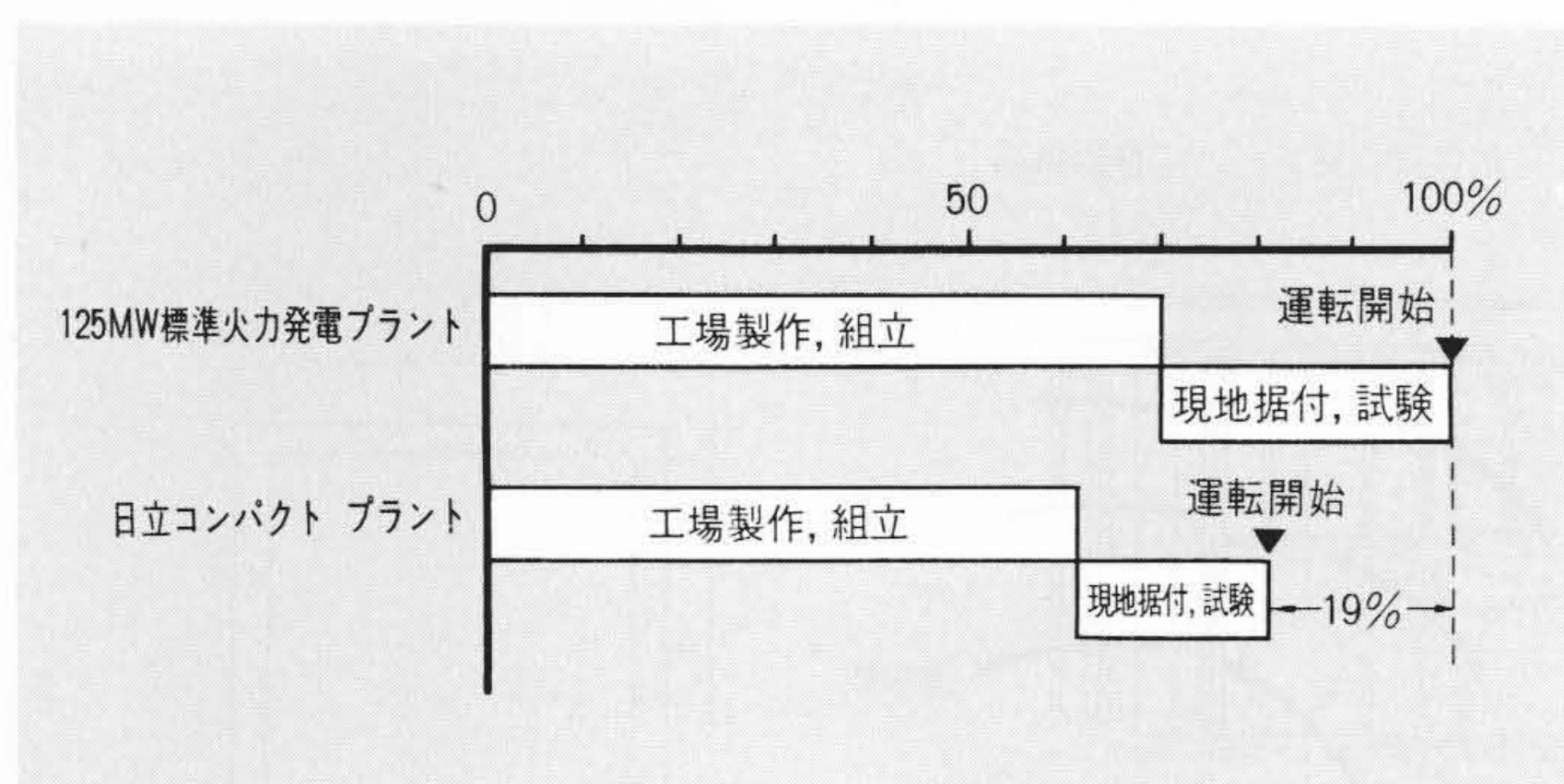


図6 火力発電プラント建設工程比較 建設期間は種々の機器開発、配置などの検討により、従来の19%短縮できる。

軸方向より下方へ流れる)を原形として、排気流を中央に集めたほうが有利であることから、対向流形としてこれをN形排気室と呼び、強度、変形、振動数及び排気損失を縮小モデルで確認した。

K形排気室の長所であるスチームガイドの設置、軸方向寸法の短縮、ダイヤフラム支持部の剛性強化のため、タービン軸方向に多数のステーパイプ取付などはN形排気室へそのまま流用した。更に、高低圧連絡管は低压ケーシング下部へ配置し、水平面フランジと低压ケーシングの支持を従来形と同様にするため、上半部だけから排出する構造とした。このN形排気室の剛性と振動を確認するため、実機の $\frac{1}{10}$ の縮小鋼板モデルを製作した。実験は高压ケーシング側との取合、架台への取付、低压ケーシング各部の固定キも実機と同一方法で、相似縮小する方法を採った。

(1) 実験方法

低压ケーシングに加わる荷重は次の四つを考え、外力に対しては油圧ジャッキで荷重を加え、内圧荷重については実際に圧縮空気に加圧、真空荷重については真空ポンプで吸引して、実機と等価な荷重状況を作った。

(a) 低压ケーシングの熱膨張及び収縮により、低压ケーシングとソールプレート間の摩擦力によって生ずる反力(低压ケーシング固定キの位置により、タービン軸方向と軸方向直角方向の反力がある)

(b) 高压ケーシング側の重量の一部が、高压ケーシング取合垂直継手面に加わる荷重及び排気室仕切板と低压ダイヤフラムサポート部の高压側、低压側の圧力差並びに高低圧連絡管の内側と外側の圧力差による荷重

(c) 低压排気室外部の大気との圧力差による真空荷重

強度試験のモデルと実機との相似性については、相互に生ずる二つの物理的、又は力学的現象が共通の方程式を満足するようにモデルの諸量に対する縮小比を調節し、モデルで行なった現象から実機に起こるべき現象を推論する方法として次元解析を適用した。これは、バッキンガムの定理によって基本方程式を無次元積の関係式に書き直しておき、一つ一つの無次元積がすべてモデルと実機との間で共通の値を保つようにモデルの縮尺を決めれば、両者の現象は完全に共通な方程式を満足する方法を採った。

(2) 試験結果及び検討

前述した荷重条件で各種試験を行なった結果は、次に述べるとおりである。

(a) 応力

応力の全体の評価としては、各荷重条件のうち熱膨張による反力の荷重によるもの及び自重による垂直荷重による

応力値は低くて問題はなく、更に真空荷重、内圧荷重の場合も前者よりも高くなるが、レベル全体が低く各条件を重ね合わせた最悪のものでも 5 kg/mm^2 以下になり問題はなかった。

(b) 変形

各々の荷重条件での変形量から、これらの条件が全部重なった場合、起動時ダイヤフラム部で軸方向に 0.41 mm の変形となるが、従来の低压ケーシング変形の実測値では、 60 MW タービンの工場試験時に 0.5 mm の例があり、これとほぼ等しい条件下なので、従来並みと考えられる。

本低压ケーシングは、軸受が排気コーン上になく直接架台の上にあるので、変形については回転体と静止体との間隙についての変形を考慮すればよい。

(c) 振動

本排気室構造の固有振動数については、全体の基本振動数と各部分の基本振動数を測定した。まず、全体の基本振動数は実機に換算して 96.5 Hz が実測され、各部の基本振動数もいずれの場所でもこれ以上であり、ロータ定格回転数、ロータ危険速度に対して十分に離れているので問題はない。

(3) 有限要素法による変形解析

低压ケーシングの変形を三次元として、有限要素法による解析を行なった。計算方法は「はり付立体薄板構造物」とし、境界条件として左右は対称としケーシングの前後も対称と仮定し、ケーシングの板材のほかに、補強部材として、補強リブ、排気フランジ、水平フランジ、ステーパイプなどを考慮に入れ計算した。計算結果と実測値は実用上差し支えない範囲で良く一致した。

(4) 排気性能試験

試験用モデルは、実機の $\frac{1}{10}$ の相似縮小鋼板製モデルを製作し、モデルは実機での動翼、静翼がないため、これらに相当する絞り面積をもつノズルリングを設置し、空気流により内部高低圧連絡管の圧力損失、及び排気損失の実測を行ない、アクリル板で同様に $\frac{1}{10}$ の相似縮小モデルを作り、排気流線を観察した。

(a) 試験結果及び検討

(i) 内部高低圧連絡管

本タービン構造は、最終段と最終段前の2段落が対向複流形になっている。発電機側の段落には内部高低圧連絡管

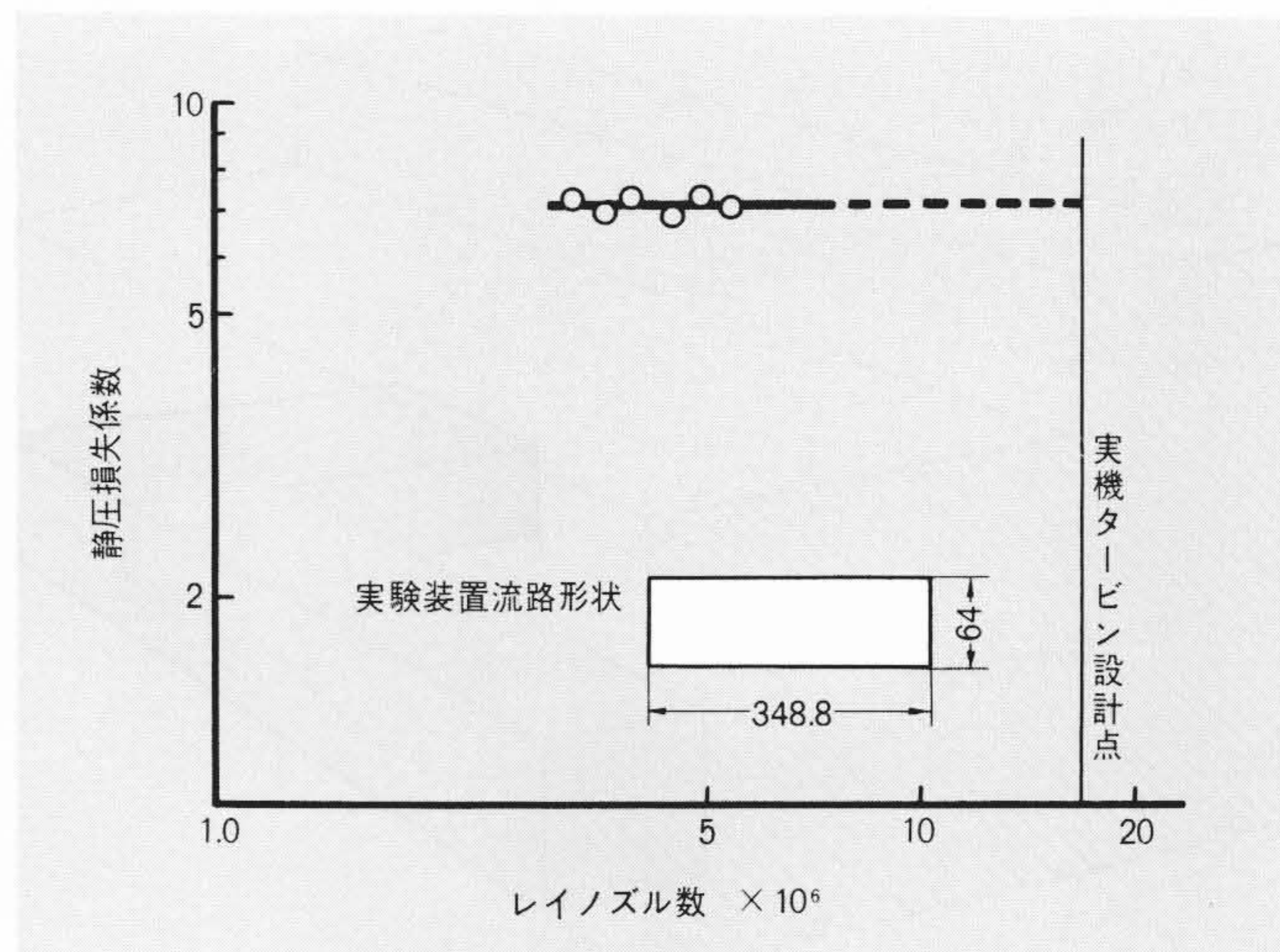


図7 高低圧連絡管静圧損失測定結果 一般に損失係数は、レイノルズ数が 10^6 以上になると不変になると言われている。

を介して連絡されており、この圧力損失を実測した。本連絡管は、高圧部出口より90度転向する部分が分流点を含めて4箇所あり、図7に静圧損失の測定結果を示す。これは高低圧連絡管の直径（この場合は形状が長方形なので平均流体深さ）を代表長さとしてレイノルズ数を計算し整理してある。この測定結果から、実機タービン設計点まで損失係数は不変と推定され、実機タービンの設計点の圧力損失を算定すると、内部高低圧連絡管入口圧力で2.5%に相当する圧力損失となり、一般に高低圧連絡管の圧力損失は約3%として計算されているので、本構造の圧力損失は従来並みである。

(ii) 排気損失

一般に、²⁾タービン排気室に発生する損失は、最終段動翼出口から排出した蒸気流が排気室出口（排気フランジ）までに達する間に生ずる流れの転向に伴う損失、渦流の発生に伴う損失、流速の不均一に伴う混合損失、壁面、リブなどで生ずる抵抗損失などが考えられている。排気室での静圧損失測定結果を図8に示す。実機タービンの設計点でのレイノルズ数は、 2.7×10^6 であるが、本縮小モデルは試験設備の関係から 1.5×10^6 程度となったが、一般に損失係数はレイノルズ数が 10^6 以上になると不変になると言われているので、本実験値をそのまま採用できる。

実測された静圧損失係数のレベルを従来の排気室に比較するため、図9に示すように、静圧損失係数、最終段の環帯面積、排気室出口面積との比をもって整理すると、N形排気室構造は、両側排気は下方排気に比較して、最終段からの排気は排気フランジ端に到達するまで転向させられる箇所は少なく、かつ距離が短いため、軸方向短縮形でありながら従来形とほぼ同一の静圧損失係数が得られた。上述の排気室での最終段出口レイノルズ数に対する静圧損失係数の関係を用いて、実機タービンの定格真空、定格出力を条件として、全排気損失を熱消費率換算で比較すると、0.22%良くなる。

(5) 試験結果の要約

縮小モデルによる試験結果を要約すると次のとおりである。

- (a) 応力は全体的にレベルが低く、最悪の条件でも 5.0 kg/mm^2 以下となり問題はない。
- (b) 変形レベルは従来形とほぼ同程度である。

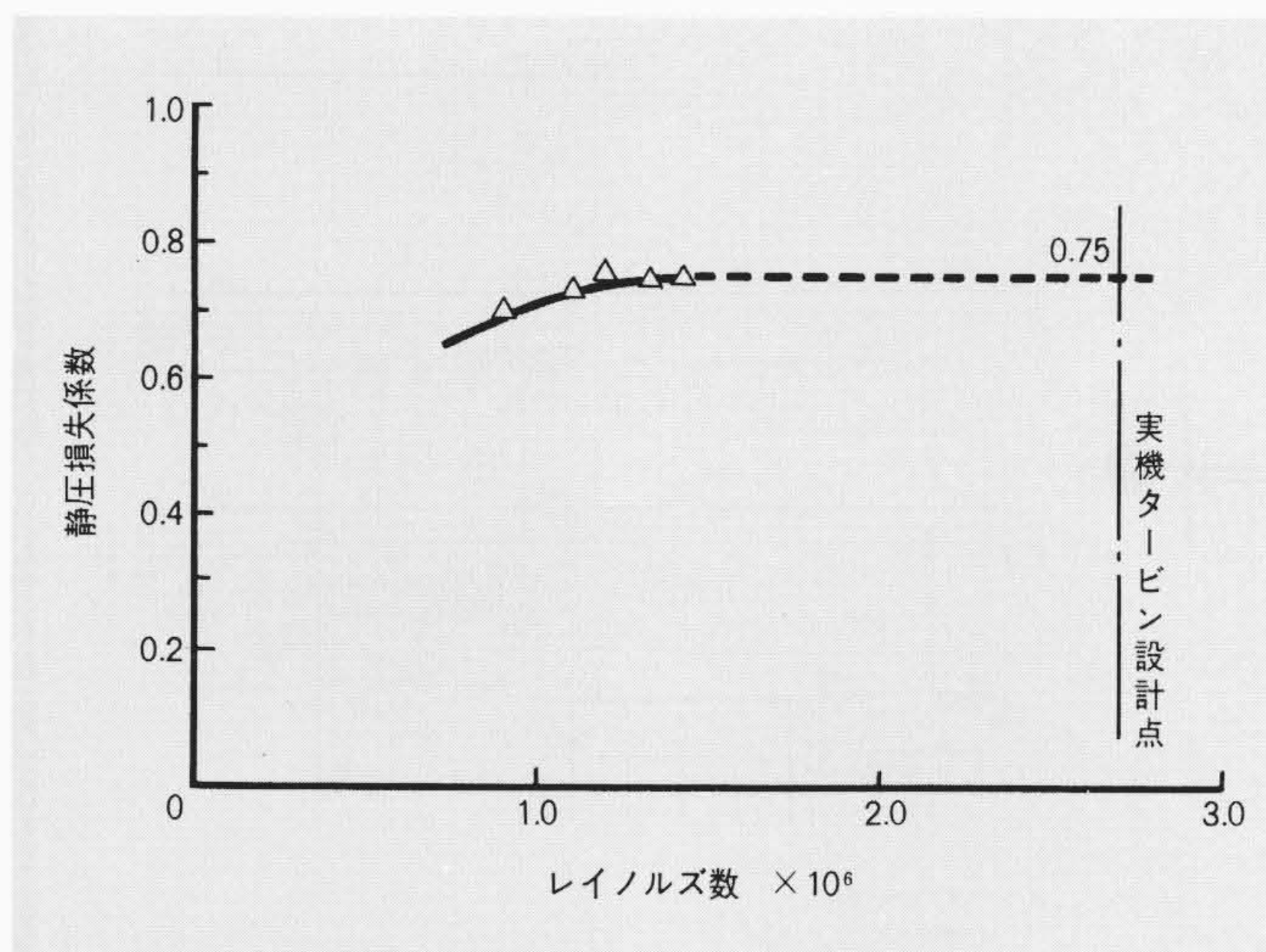


図8 排気室静圧損失測定結果 損失係数は、レイノルズ数 10^6 以上になると不変なので、試験データを実機タービン設計点まで延長できる。

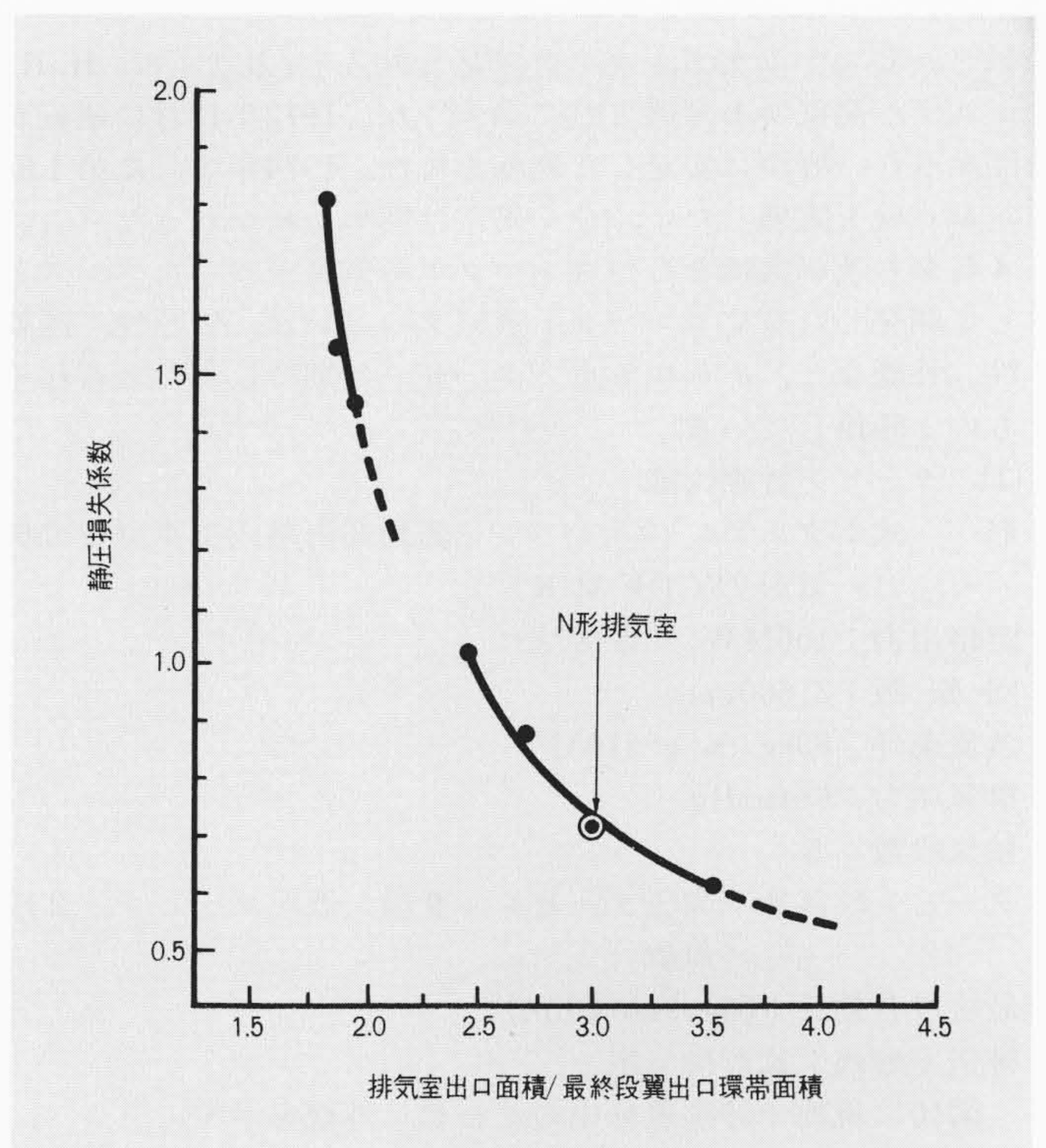


図9 排気室静圧損失係数と面積比の関係 N形排気室損失は従来形よりわずかに少ない。

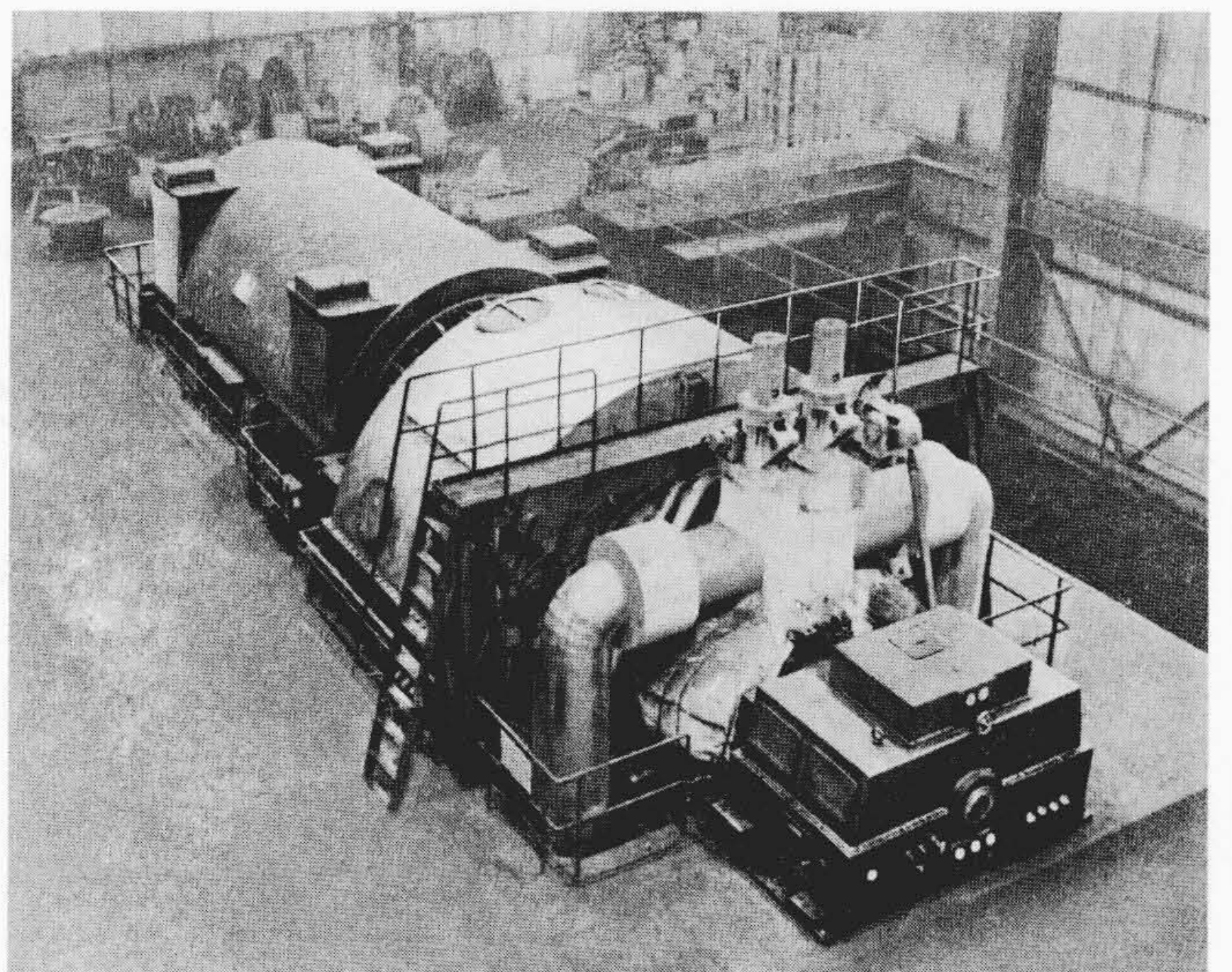


図10 カナダ、カナディアン・ユーティリティズ、H.R. ミルナー発電所納め150MW非再熱タービン 高圧タービン部のタラップは、上部加減弁点検用のものである。

- (c) 低圧ケーシングの全体の振動数は、96.5Hzであり、また局部で低い箇所でも、60Hzに対し50%以上離れており問題はない。
- (d) 本構造の内部高低圧連絡管の圧力損失は、最大流量時で入口の2.5%に相当する。
- (e) 排気損失は、従来形より熱消費率換算で0.22%良くなる。

4 類似コンパクト蒸気タービンの運転実績

前述のN形排気室をもつ日立コンパクト蒸気タービンの原形となったK形排気室で、下方排気形 150MW コンパクト蒸

気タービンがカナダ、カナディアン・ユーティリティズ、H.R. ミルナー発電所1号機として納入され、1972年12月に運転が開始され、好調に安定した運転を続け、1974年3月に第1回定期点検を実施したが、全く異常は認められなかった。この4年余の運転実績をもつコンパクト蒸気タービンをベースとして開発した日立コンパクト蒸気タービンは、信頼性、運転性、性能など、あらゆる点でユーザーの期待にこたえられるものと確信している。

(1) タービン計画仕様

形式：タンデム コンパウンド衝動非再熱式1車室複流排気形(TCDF-23K)

定格出力：150MW(発電機端)

回転数：3,600rpm

蒸気条件：88kg/cm²g-510°C

排気圧力：684mmHg

抽気段数：5

タービン段落数：高压タービン 9段、低压タービン 2段
複流

最終段有効長：584.2mm(23in.)

排気室形式：K形排気室

図10に現地で営業運転中のタービン外観を示す。

(2) 現地運転データ

現地運転では振動は非常に少なく、伸び差、軸受などの運転特性も極めて安定しており、性能試験の結果も計画値どおりであった。表1に現地での運転データを示す。

5 結 言

以上、短納期でコンパクトな発電プラントを実現させた日

表1 カナダ、カナディアン・ユーティリティズ、H.R. ミルナー発電所納め150MW非再熱タービン現地運転データ 現地での定格運転時のデータを示す。

項 目	タービン		スラスト軸受		備 考
	1	2	前側	後側	
軸受振動(μ)	4.6	3.0	—	—	両振動(垂直方向)
軸受排油温度(°C)	52.0	55.0	58.0	58.0	給油温度 48°C
100%負荷	瞬時最大速度 上昇率		整定速度		
しゃ断試験	106.1%		103.9%		

立コンパクト蒸気タービンのN形排気室の開発成果について紹介したが、本成果が一般火力プラント、又は蒸気、ガスタービン コンバインド プラントで、

(1) 建設期間の短縮

(2) 主要機器のブロック化により、最適な作業条件で工場内で最大限の組立を行なうことにより、現地組立費用の節減。

(3) 横置復水器、N形排気室の採用により、低床化などの特長を生かして年々高騰する建設費の低減。

などの一助ともなれば幸いである。

終わりに、本開発を担当された関係各位の努力に対し深謝する。

参考文献

- 坂井：「大容量STAGプラント」火力原子力発電，Vol. 25，No. 1 (1974)
- 佐藤，安ヶ平ほか：「タービン排気室特性の解明」，日立評論，55，863 (昭48-9)



特許の紹介

火力系統単独分離方式

久保隆生・村井勝治

特許 第799045号 (特公昭50-13932号)

電力需要の増大に対応して、経済性と信頼度の向上を図るため、機器の大容量化、系統の連系が積極的に進められている。

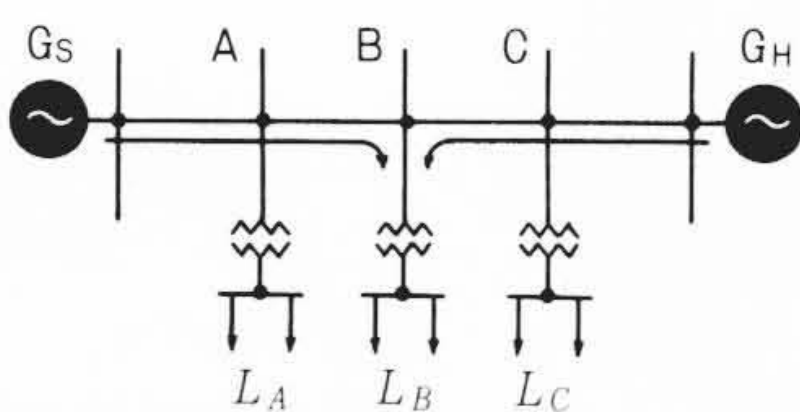
系統連系は安定度の維持、電力融通、設備の経済的運用の点で有利である反面、系統事故時の影響が大きい不利がある。特に新鋭の火力発電機は、周波数が低下した状態では運転できないため、次に脱落していき、それが更に周波数を低下させることとなり、系統を壊滅させる可能性がある。

この対策として、図1に示すように火力発電所Gsと水力発電所G_Hとが電気所A、B、Cで連系されているとき、周波数低下に応じて潮流見合点Bで分離することが提案されているが、系統が複雑になると見合点を予定しておくことは不可能となる。

本発明は図2に示すように、潮流の検出と負荷の演算とにより、任意の電気所で見合点の判定ができるようにくふうされたものである。図2は火力側が2ルート、水力側が3ルートの送電系統を持つ電気所の例で

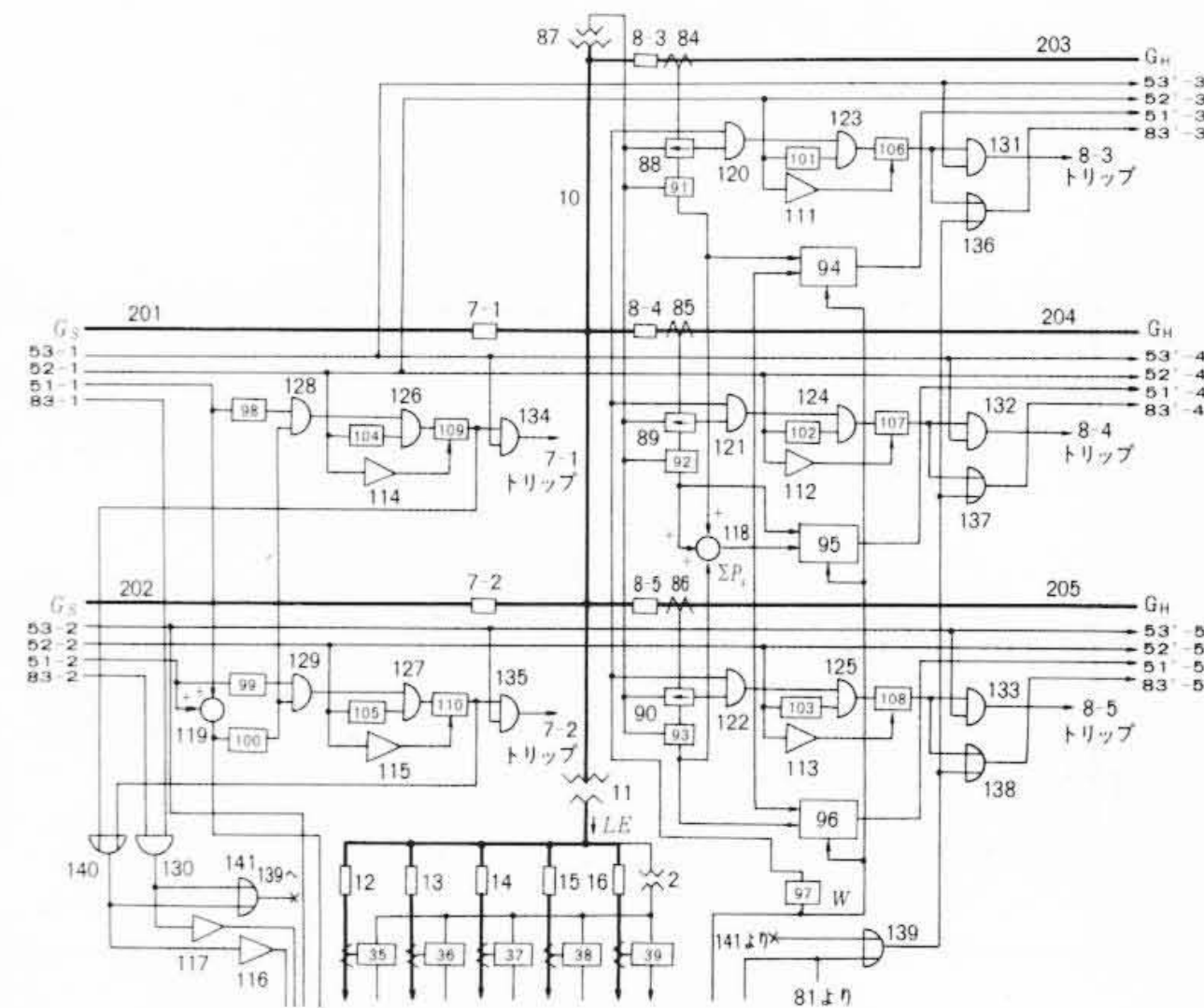
ある。水力側の送電系統の潮流の方向が91～93により検出され、水力側から突き下げてくる潮流があり、かつ火力側で系統分離が

行なわれていないことを条件に図の電気所で系統分離が実行され、かつ水力側から突き下げていた潮流分の負荷制限が行なわれる。



注：Gs=火力発電所
GH=水力発電所
LA=電気所A負荷
LB=" B "
LC=" C "

図1 電力系統単線図



注：ΣPi=電力突合せ回路
LE=電気所負荷

図2 電気所構成具体回路例図