

原子力用大容量蒸気タービン発電機

Recent Techniques of Large-Scale Nuclear Steam Turbine and Generator

昭和59年2月、日立製作所の記録機で、かつ国内でも最大級である東京電力株式会社納め福島第二原子力発電所2号機1,100MW蒸気タービン・発電機設備が営業運転を開始した。本稿では、この蒸気タービン・発電機の特徴について紹介するとともに、今後の大容量原子力用蒸気タービン・発電機への高性能、高信頼性の要求にマッチした新技術の適用などについて述べる。

漆谷春雄* Haruo Urushidani

古川雅夫* Masao Furukawa

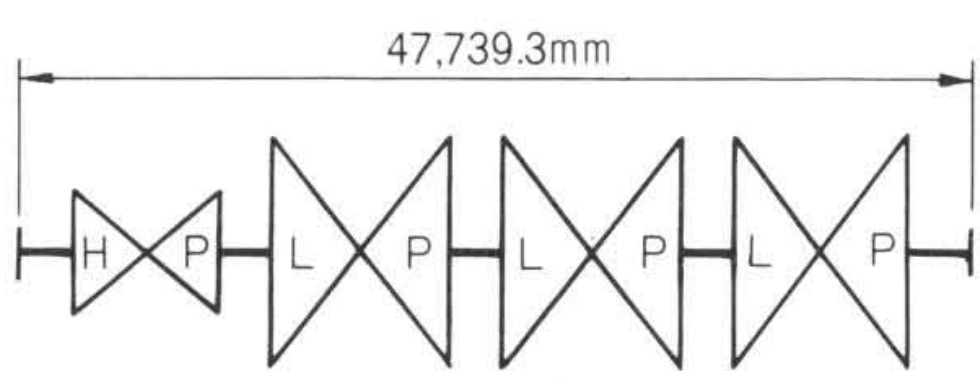
実松俊弘* Toshihiro Sanematsu

桧山 太* Futoshi Hiyama

1 緒 言

最近の世界的な石油危機を契機として、原子力発電所の建設が大きくクローズアップされ、大容量の原子力発電所の建設及び計画が進められている。このたび、東京電力株式会社福島第二原子力発電所2号機(以下、福島第二・2号機という。)として納入された我が国最大容量の、最終段に41in長翼を用いた1,100MW蒸気タービン・発電機が試運転を無事終了し、営業運転に入った。本稿では、この蒸気タービン・発電機の特徴を中心に述べる。

表1 1,100MW原子力用蒸気タービンの主要仕様 福島第二・2号機の主要仕様を示す。

項 目		仕 様
定格出力 タービン型式 回 転 数		1,100,000kW TC6F-41 1,500rpm
車 室 数		 4車室
主蒸気圧力 主蒸気温度 抽気段数		66.8kg/cm ² 282°C(飽和) 6
タ 段 レ ビ 数 ン	高压段 低压段 計	8×2流 9×6流 17(70ホイール)
最 終 段 翼 長	翼 長 平均直径 周 速 環帯面積	1,041.4mm(41in) 3,502.2mm(138in) 357m/s 68.78m ²
制 御 装 置	调速機 主蒸気止め弁 蒸気加減弁 組合せ中間弁	EHC(電子油圧式ガバナ) 4個 4個 6個
複 水 器	形 式 冷却水温度 冷却水量 伝熱面積	3胴式 19°C 211,200m ² /h 80,100m ²

2 蒸気タービン

本機は、主蒸気条件がゲージ圧66.8kg/cm²・282°C、非再熱タンデムコンパウンド6流排気形(TC6F-41)、回転数1,500rpmの原子力用蒸気タービンである。表1に本タービンの主要仕様を示す。構造上の特徴を列記すると、次のようになる。

(1) 低压ロータはシャフトにディスクを焼ばめた構造である。また、湿り度の高い段落の動翼先端にドレン分離溝を設け、積極的に湿分を分離する構造としている。

(2) 高压ケーシング及び主要弁体には浸食防止のためにCu入り鋳鋼を用い、減肉対策のために湿分分離器本体あるいは給水加熱器、抽気管などに初めて低合金鋼を使用している。

(3) 給水加熱器の管材には、低カーボン・ステンレス鋼を使用して、SCC(応力腐食割れ)に対しても考慮が払われている。

(4) 蒸気シール面、高压車室及び低压内部車室の水平継手面には、改善の方法としてステンレス鋼を肉盛するなどの浸食防止を行なっている。

発電所での試運転では、蒸気タービン軸振動解析システムHICVA(High Level Computerized Vibration Analyzer)を用いることなどにより、タービン発電機の振動調整を行ない、振動を極力小さくすることができた。その後の振動トラブルもなく、順調に運転を続けている。また、タービンプラントの性能についても、当初の計画値を上回る良好な結果を得ることができるとともに、日立製作所独自の技術を盛り込んだ横型湿分分離器の性能も所期の特性が確認されている。

図1にこの蒸気タービンの構造図を、図2にその外観を示す。

2.1 タービン本体

1,500rpm機を採用し、最終段の流路面積を大きくするために、41in最終段長翼が採用されている。図3は41in長翼を用いた低压ロータを示している。湿り度の高い低压後部(L-1～5)段では、動翼先端にドレン分離溝を設け湿分を分離する構造としている。また、溝付翼の表面はフレームハードニングによる表面焼入れを行ない、蒸気中の水滴によるエロージョン防止を図っている。最終段では、湿り度が高くなるため、耐エロージョン材料であるフォームドステライト板を溶接で取り付けて、12Cr鋼の母材を保護している。

2.2 ダイアフラム

ダイアフラムは一般に12Cr合金鋼を用いた溶接構造が用いられるが、湿り度の高くなる低压部の後段については、形状が複雑なので合金鋳鉄を採用している。また、外輪側には動翼の外周にペリフェラルチャンバを全段に設けて、動翼により振り飛ばされた水滴を捕獲し、抽気段に導く構造となっている。

* 日立製作所日立工場

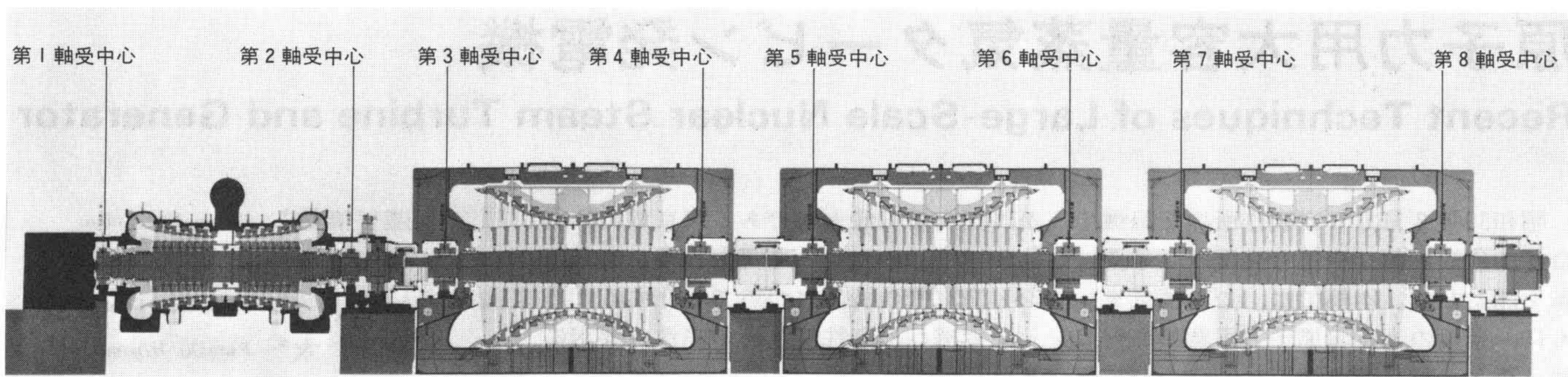


図1 1,100MW原子力用蒸気タービンの構造図 TC6F-4I形原子力用蒸気タービンの断面を示す。

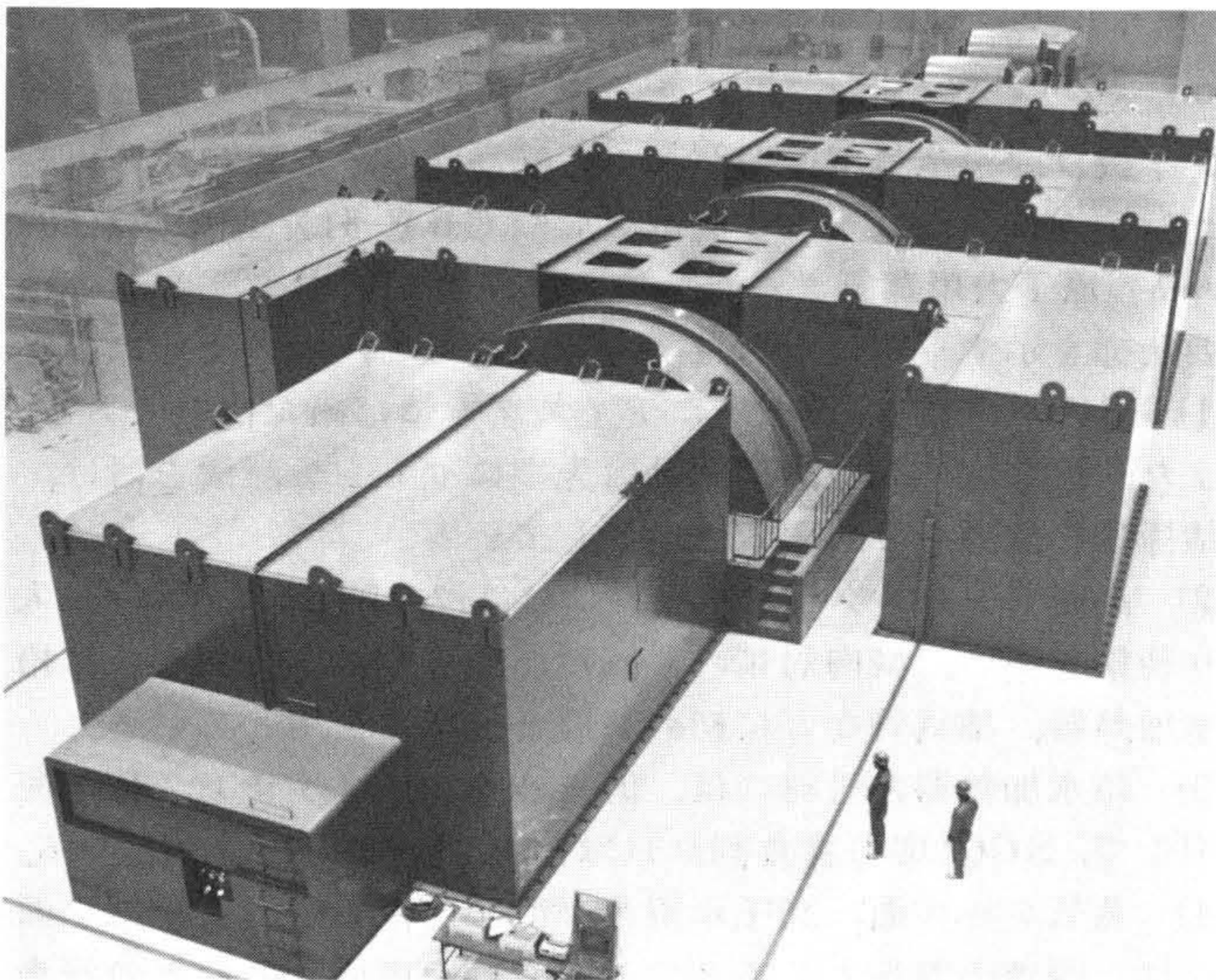


図2 1,100MW原子力用蒸気タービン・発電機外観 福島第二・2号機の据付状況を示す。

いる。

2.3 ケーシング

高压タービンは図1に示すように一重ケーシング構造となっている。材質は炭素鋼であるが、浸食の観点から微量のCuを混入して耐食性の向上に対する配慮がなされている。主蒸気止め弁、蒸気加減弁、組合せ中間弁についても同様にして耐食性を増している。

低压ケーシングは寸法が大きく、溶接性及び機械加工上の面から分割構造となっている。材質は外部ケーシングはSM材(溶接構造用圧延鋼材)を使用しているが、内部ケーシングの場合には高压蒸気に触れるため、微量のCuを含んだ耐食性の良い材料を使用している。

蒸気噴流が直接衝突し、浸食が起こりやすい部分には、12Crステンレス鋼のバッフルプレートを設置などの浸食防止を行なっている。

3 湿分分離器

高压タービンと低压タービンを連結するクロスアラウンド管の途中には、図4に示す横形の湿分分離器を設けている。高压タービン排気の湿り蒸気は、横形湿分分離器の胴体下部から入り、V字形に傾斜して配置された波板エレメントにより湿分分離された後、胴体上部の出口ノズルから排出され組合せ中間弁によって制御され、低压タービンに導かれる。この方式では50%容量×2基としてあるので、従来の25%容量×4基に比較してスペースファクタが優れた分離性能の高い構造が採用されている。

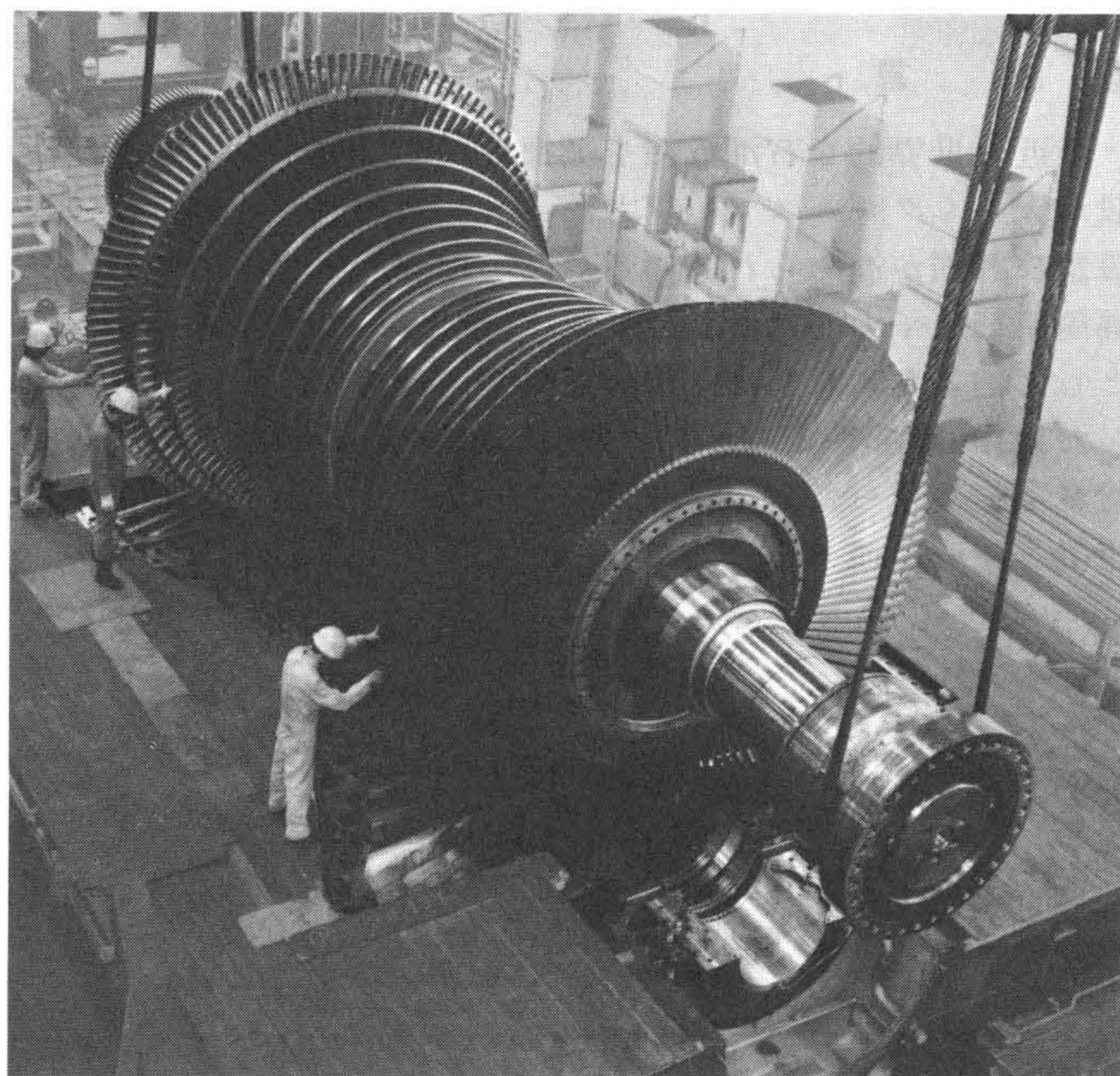


図3 低压タービンロータ 41in最終段長翼をもつ低压タービンロータを示す。

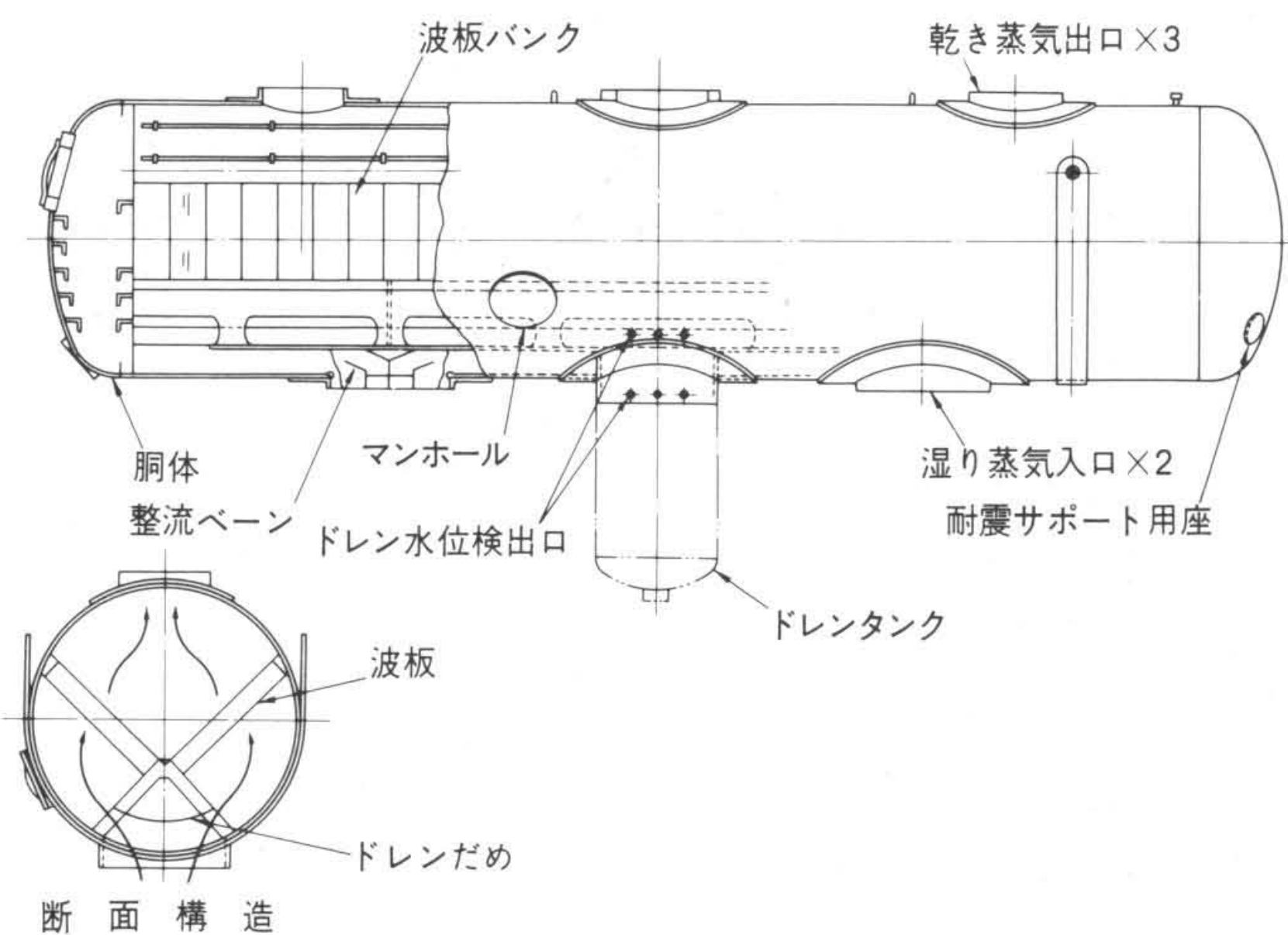


図4 横形湿分分離器の構造 分離器下方から蒸気が流入し、上向きに流出する。波板配置を傾斜させることにより、器内の空間を有効に利用し、コンパクト化した構造となる。

4 タービングランド蒸気系

蒸気タービン、原子炉給水ポンプ駆動用蒸気タービンのシャフトパッキン部及び主要弁のグランド部はエバポレータで発生した非放射性蒸気を用いてシールしている。

5 タービンバイパスシステム

BWR型(沸騰水型)原子力発電所用蒸気タービンの制御上の特徴の一つに、原子炉の圧力を蒸気タービン側で一定に制御するという点がある。このタービンバイパスシステムは、主蒸気管から分岐され、タービンバイパス弁及び減圧器を通過して復水器に至る弁、配水系であり、主蒸気をタービンに通さず直接復水器へ排出する目的で設けられている。通常の運転中には、タービンバイパス系はタービンバイパス弁によって閉じられているが、起動時や負荷遮断時など原子炉から発生した蒸気がタービン通過蒸気量よりも多い場合、その余剰蒸気をタービンバイパス系統を通じて復水器へ流し、原子炉の圧力が上昇するのを抑える。

6 EHC(電子油圧式ガバナ)

大容量原子力では複雑な制御となっているが、応答の良い制御装置が要求されるので、EHC(電子油圧式ガバナ)を採用している。電子制御回路(EHC盤)、高圧制御油を発生する高圧油圧ユニット及びEHC盤からの電子信号を受け、高圧油により作動する弁駆動装置から成っている。蒸気タービンのトリップ検出器については多重化を行ない、信頼性の向上を図っている。

7 復水器

原子力用蒸気タービン復水器は、火力用と比較して同出力のものでも多量の蒸気を処理するため、約1.5倍も大きくなる

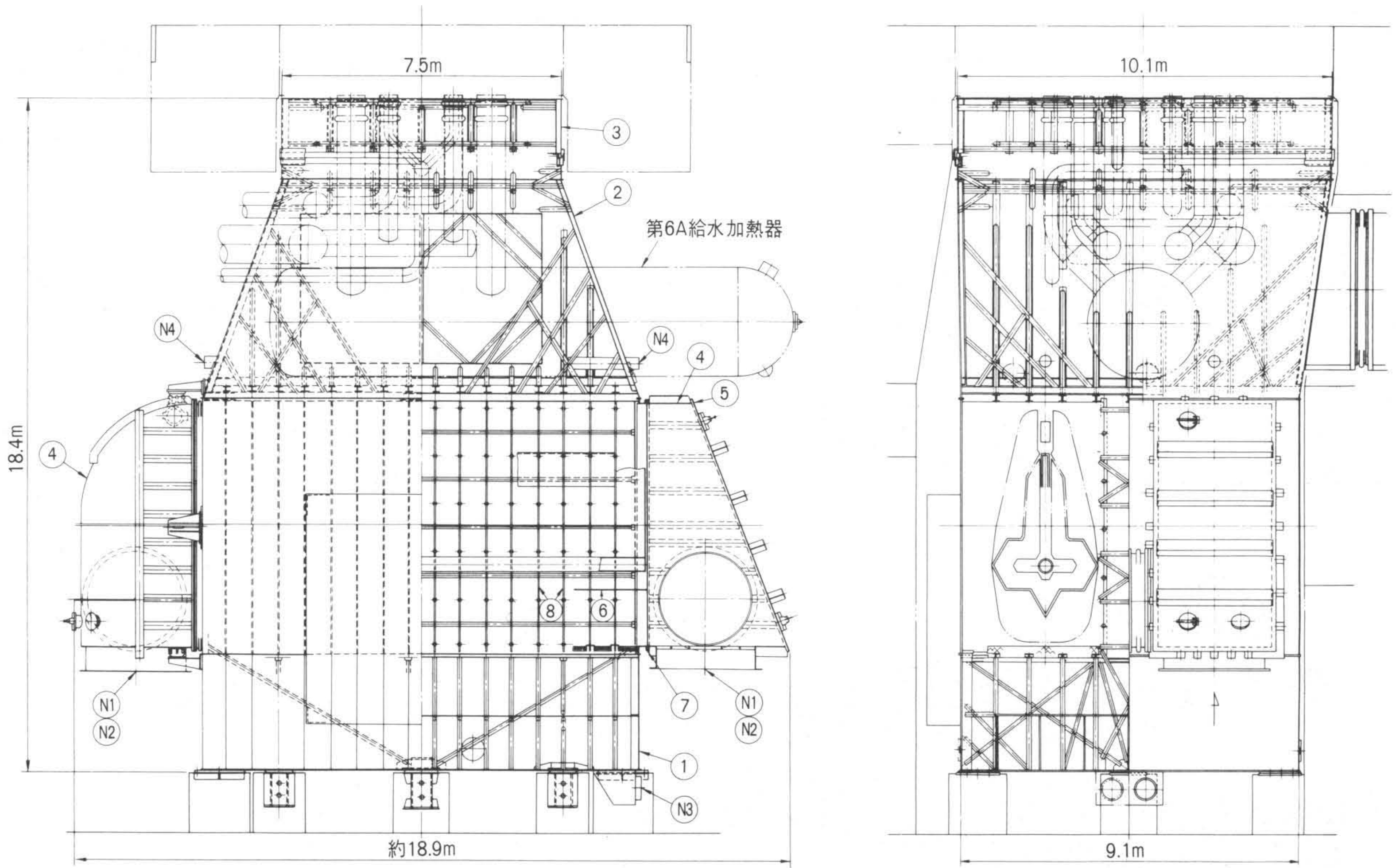
ので6流排気の本プラントでは3胴式を採用し、タービン軸と直角に配置している。図5に復水器の構造図を示す。本プラントでは、復水器胴体材を耐候性鋼板化するなど、被ばく低減対策を行なうとともにチタン製冷却管を全面的に採用している。チタン製復水器の特徴は、次のような点が挙げられる。

- (1) 海水に対する耐食性が高く、信頼性が向上する。
- (2) 形状寸法がコンパクト化するので、建屋スペースの縮小化が図れる。
- (3) 冷却管重量の低減による軽量化により、耐震性の向上が図れる。

8 原子炉給水ポンプ駆動用蒸気タービン

RFPタービン(原子炉給水ポンプ駆動用蒸気タービン)は、湿り度の高い蒸気で運転される点を除いては、蒸気タービン本体・制御装置とも基本的には火力用のボイラ給水ポンプ駆動用蒸気タービンと同じである。

RFPタービンは、主タービンの常用運転時に55%容量機2台でそれぞれ原子炉給水ポンプを駆動し、常時主タービンで必要な量の給水を確保できる機能をもっている。本タービンは、2種の異なった圧力蒸気条件で運転可能なように設計されている。常用運転時には、主タービンの組合せ中間弁前の低圧蒸気によって運転される。また、主タービンの負荷が $\frac{1}{4}$ 負荷以下の部分負荷時には、湿分分離器後の蒸気では流入蒸気量が不足する場合もあるため、抽気系から主蒸気に切り替えて、主蒸気ヘッドからRFPタービンの高圧蒸気止め



管台一覧表

符号	名 称	個数	呼び径
N1	冷却水入口	2	2,600A
N2	冷却水出口	2	2,600A
N3	復水出口	2	600A
N4	空気出口	4	300A

部 品 表

番号	品 名	個数	備 考	番号	品 名	個数	備 考
①	下 部 胴	1	SMA41A	⑤	水室カバー	2	SS41(内面ゴムライニング)
②	上 部 胴	1	SMA41A	⑥	復水器細管	23,552	TTH35W
③	連 結 胴	1	SMA41A	⑦	管 板	4	TP49H
④	水 室	4	SS41(内面ゴムライニング)	⑧	支 え 板	32	—

図5 復水器構造図 1,100MW級の原子力蒸気タービン用復水器の構造を示す。

弁を経て、1個の高圧蒸気加減弁を通りタービンに流入し、必要な動力・回転速度を保持するようになっている。

RFPタービンの制御装置は、原子炉からの電気信号により、炉水位を一定に保持するのに必要な給水ポンプ吐出し量、吐出し圧に見合った駆動動力、回転数を維持する。

9 タービン発電機

1,300MVA 4極タービン発電機は国内最大容量機であり、設計・製作に際しては高効率・高信頼性の確保、及び性能向上のため種々の新技術が採用されている。

工場での確認試験及び現地試運転の結果も非常に良好であった。本タービン発電機の特徴について、以下に紹介する。

9.1 発電機仕様と基本設計諸元

本1,300MVAタービン発電機の主な仕様と設計諸元を表2に示す。1,300MVAという超大容量機でもあり、水素ガス圧力を5.3atgとして冷却効果の増大化を図るとともに、固定子コイル、固定子鉄心端部、界磁コイルの温度分布の低減と均一化を図ることによって、全体としてバランスのとれた設計となっている。

なお、図6に本機の構造断面を示す。

表2 福島第二・2号機の主要仕様 我が国最大容量のタービン発電機である本機は、水素ガス圧力5.3atgを採用して、冷却効果を高めている。

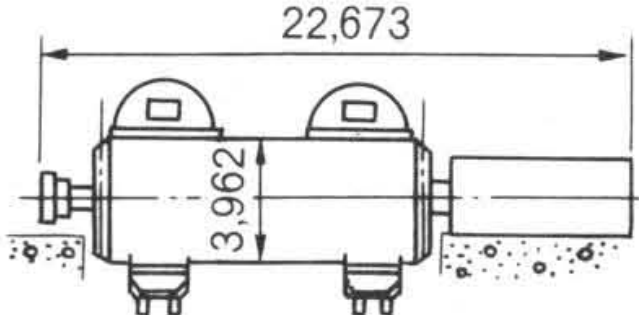
項 目		仕 様
形 式		横置全閉内冷耐爆形円筒回転界磁式ダンパ付
出 力		1,300MVA
力 率		0.9
極 数		4
回 転 速 度		1,500rpm
定 格 電 圧		19,000V
短 絡 比		0.6以上
機 内 水 素 圧		5.3atg
電機子コイル接続		4Y両側口出し
冷却方式	固定子コイル	片道流純水直接冷却
	界磁コイル	改良形ラジアルフロー水素直接冷却
励磁方式		直結交流励磁機
寸 法		

表3 1,300MVAタービン発電機における新技術と効果 損失の低減、温度上昇の低減、電磁力の対策及び運転性能向上のため、種々の新技術が採用されている。

技術的課題	新 技 術	新技術の効果
1. 損失低減、 効率向上	(1) 混合素線異断面固定子コイルの採用(図7) (2) ラジアルファンの採用 (3) シールドコア、銅シールド板付鉄心端部の採用(図8)	実測効率 99.2%
2. 温度上昇の 低減	(1) 片道流水直接冷却固定子コイルの採用 (2) 改良形ラジアルフロー水素ガス直接冷却界磁コイルの採用(図9) (3) スリット付端部鉄心の採用 (4) シールドコア、銅シールド板付鉄心端部の採用(図8) (5) 5.3atg機内水素ガス圧の採用	実測温度上昇 固定子コイル 24.3℃ 界磁コイル 30.3℃ 固定子鉄心 24.0℃
3. 電磁力対策	(1) 4Y両側口出し固定子コイルの採用 (2) 固定子コイルエンド特殊支持方式の採用 (3) リップルスプリング、テーパウェッジによる固定子コイルスロット内固定の採用	39,503Aの通電試験、突発短絡試験実施、問題なし。
4. 固定子フレーム 耐圧向上	(1) 完全球形ターミナルボックスの採用 (2) ツインドーム方式の採用	水圧試験8atg実施、問題なし。
5. 運転性能向上	(1) 全長ダンパの採用 (2) キーバー短絡リングの採用(図8) (3) シールドコア、銅シールド板付鉄心端部の採用(図8) (4) デュプレックスクーラの採用	逆相耐力の向上 過励磁耐力の向上 進相運転耐力の向上 1クーラ停止時の容量向上

9.2 発電機の特徴

本機には、各所に高効率、高信頼性確保のための新技術を採用しており、表3にその内容を示す。これらの新技術適用により、運転性能の向上が図られている。

以下に、主な構造上の特徴について述べる。

9.2.1 固定子

固定子コイルは、温度低減に効果の大きい片道流直接水冷却構造を採用し、熱履歴に対する余裕を十分取るように配慮

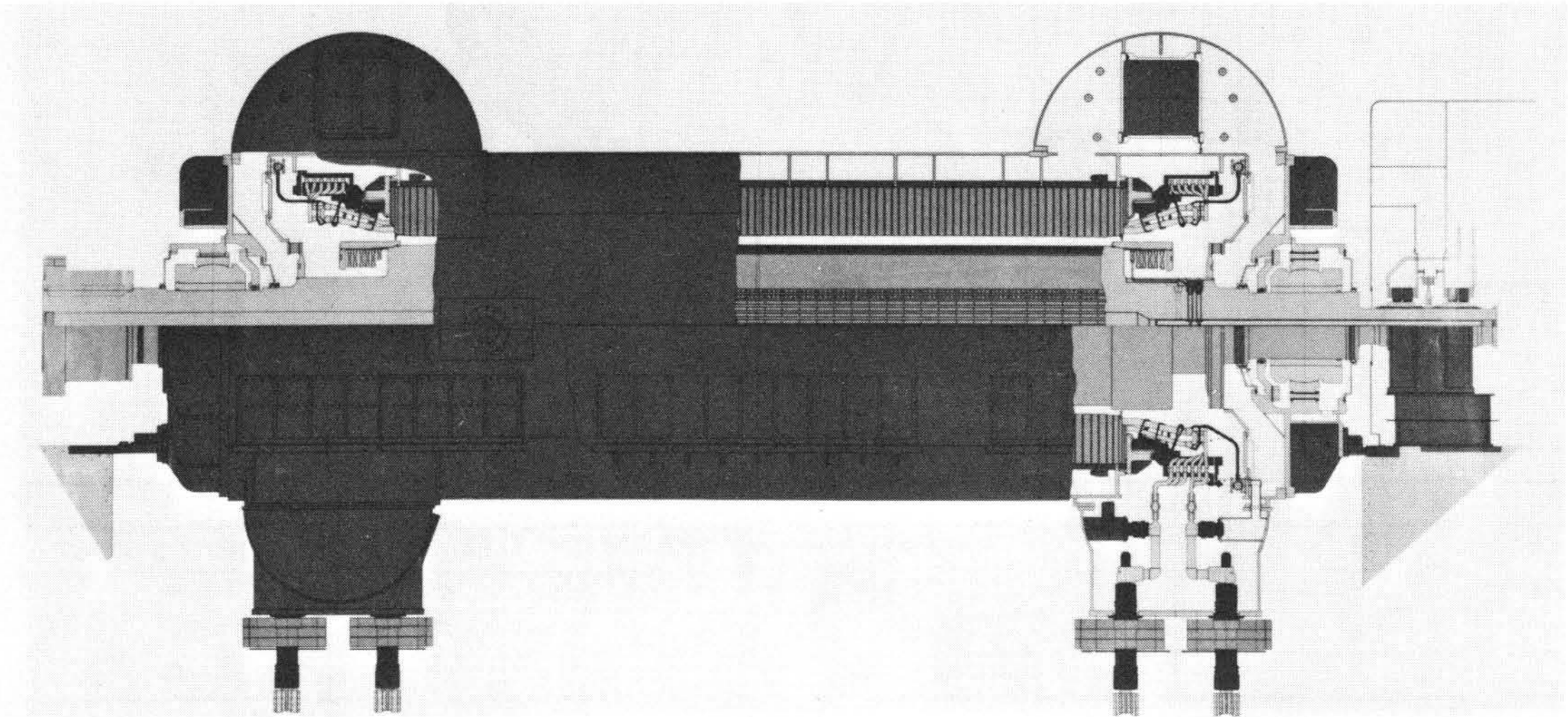


図6 1,300MVAタービン発電機の構造断面
我が国最大容量機であり、各所に新技術が採用され、高効率、高信頼性の発電機となっている。

している。また、用いられているエポキシワニス含浸絶縁高圧コイルは、多くの日立製作所実績に裏付けされた耐熱履歴性の高いものであり、リップルスプリングとテーパウェッジの組合せによるスロット内の電磁力による振動防止を図っている。更に、コイルエンド部には、熱伸縮に対して柔軟に対処できるようにスライド構造が採用されている。

効率向上の観点からは、図7に示すような混合素線異断面固定子コイルを採用している。冷却水を通すための中空素線と渦電流損(交流損)を低減するための素線高さの低い中実素線を組み合わせた混合素線を、上・底両コイルに適用するとともに上・底コイルの温度差を小さくし、上・底コイルの熱応力を小さくするため、上コイルの寸法を大きくした異断面コイルとしている。固定子鉄心は、高品質低損失けい素鋼板の採用により鉄損の低減を図っており、更に、鉄心端部温度上昇低減の目的で図8に示すようなシールドコアの適用により、鉄心端部軸方向に入射する磁束の抑制を図っている。また、FEM(有限要素法)による綿密な鉄心端部電磁界解析を行ない、損失の増加を極力抑えた構造としている。

本機の水素ガス圧力は、前述のように5.3atgと高く、固定子フレームには、完全球形ターミナルボックスやツインドーム方式を採用するなどして耐圧強度の向上も図っている。

なお、運転性能の向上策として固定子鉄心背部にキーパー短絡リングを適用しており、過励磁耐量の向上をも図っている。

9.2.2 回転子

軸材は素材重量が約200tにも及ぶ超大形のものであるが、

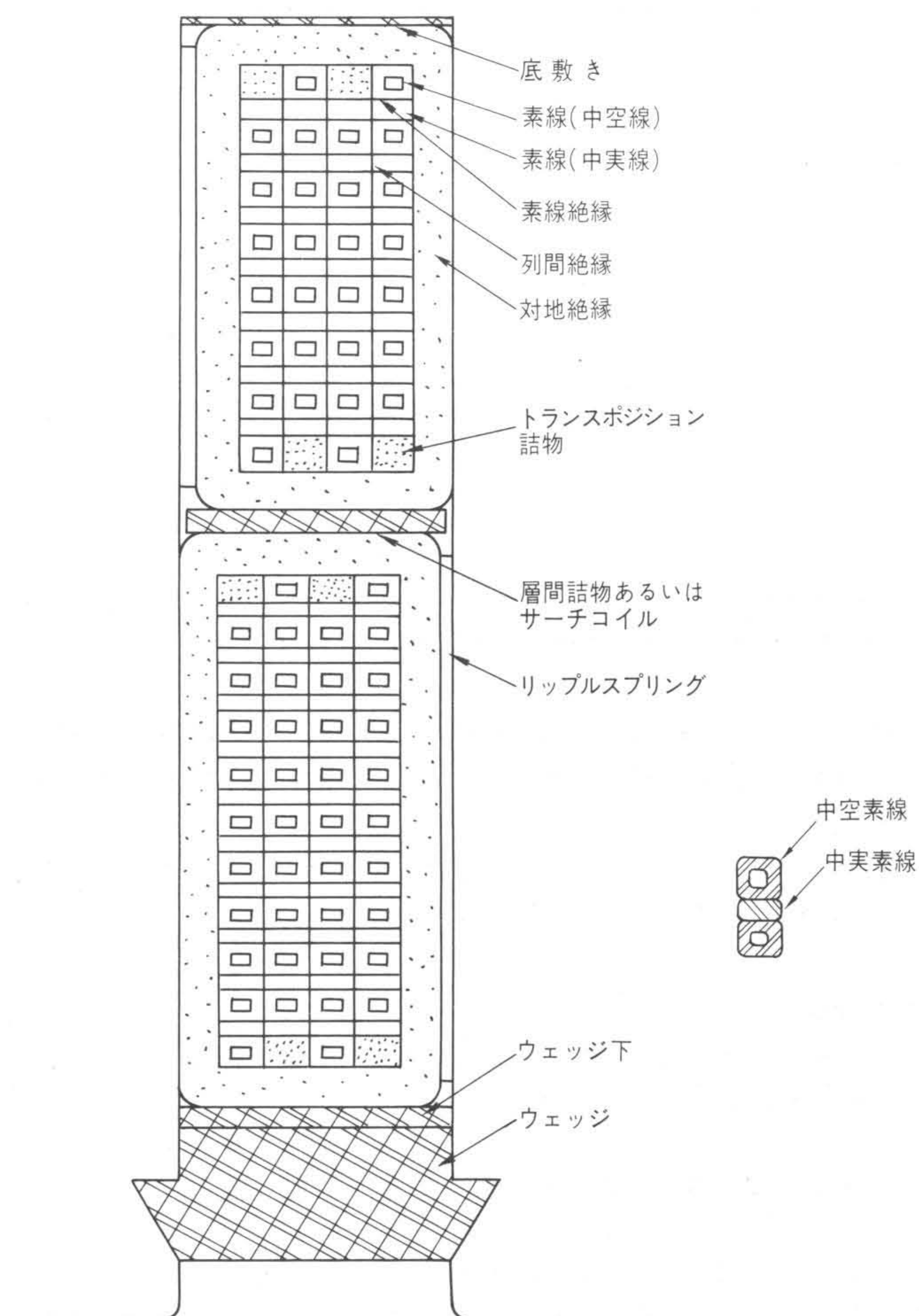


図7 混合素線異断面固定子コイル 1,300MVA機では、底コイルにも混合素線を採用して損失低減を図るとともに、上・底異断面コイルとして上・底コイルの温度上昇均一化を図り、熱応力の低減を図っている。

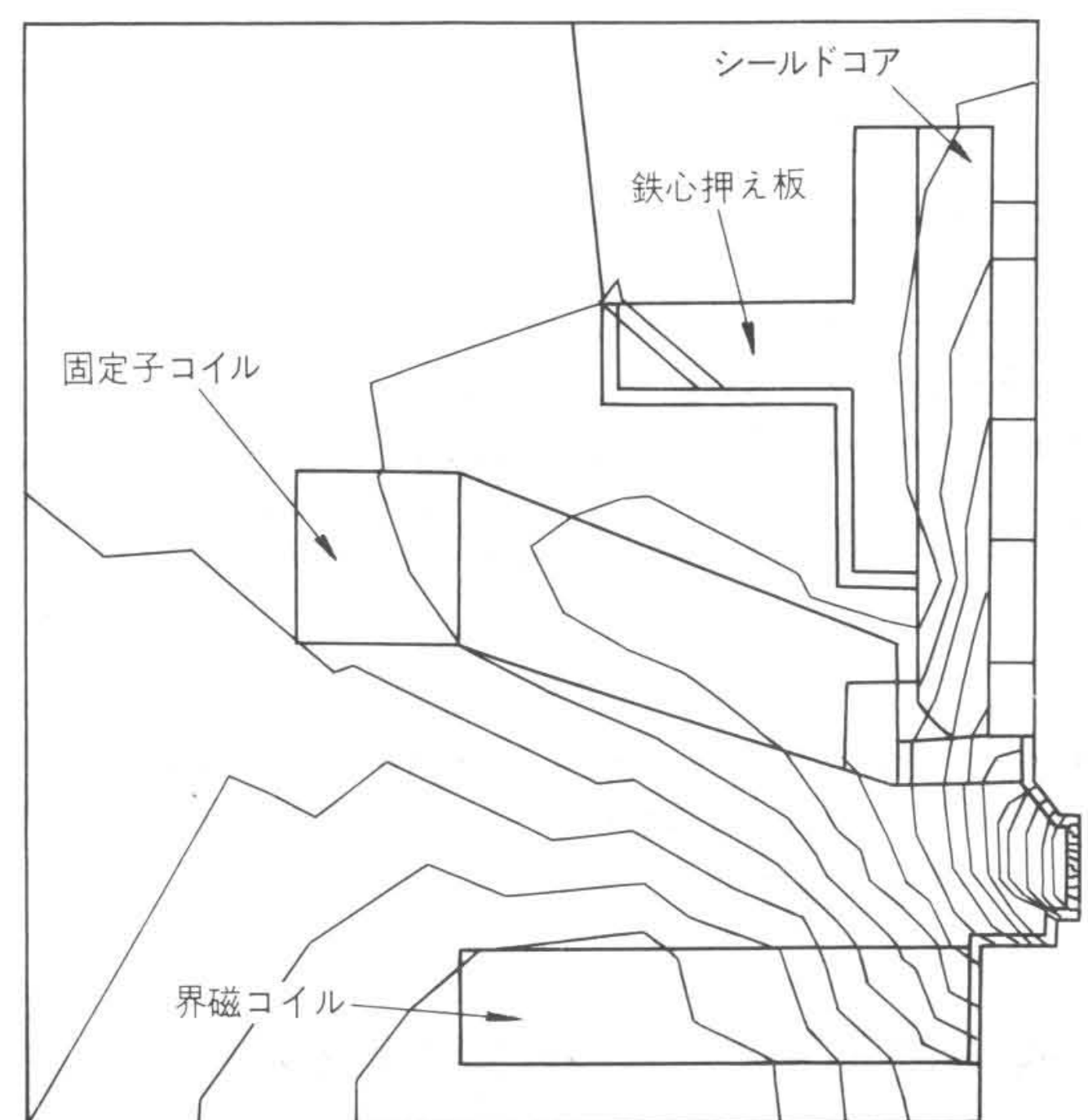
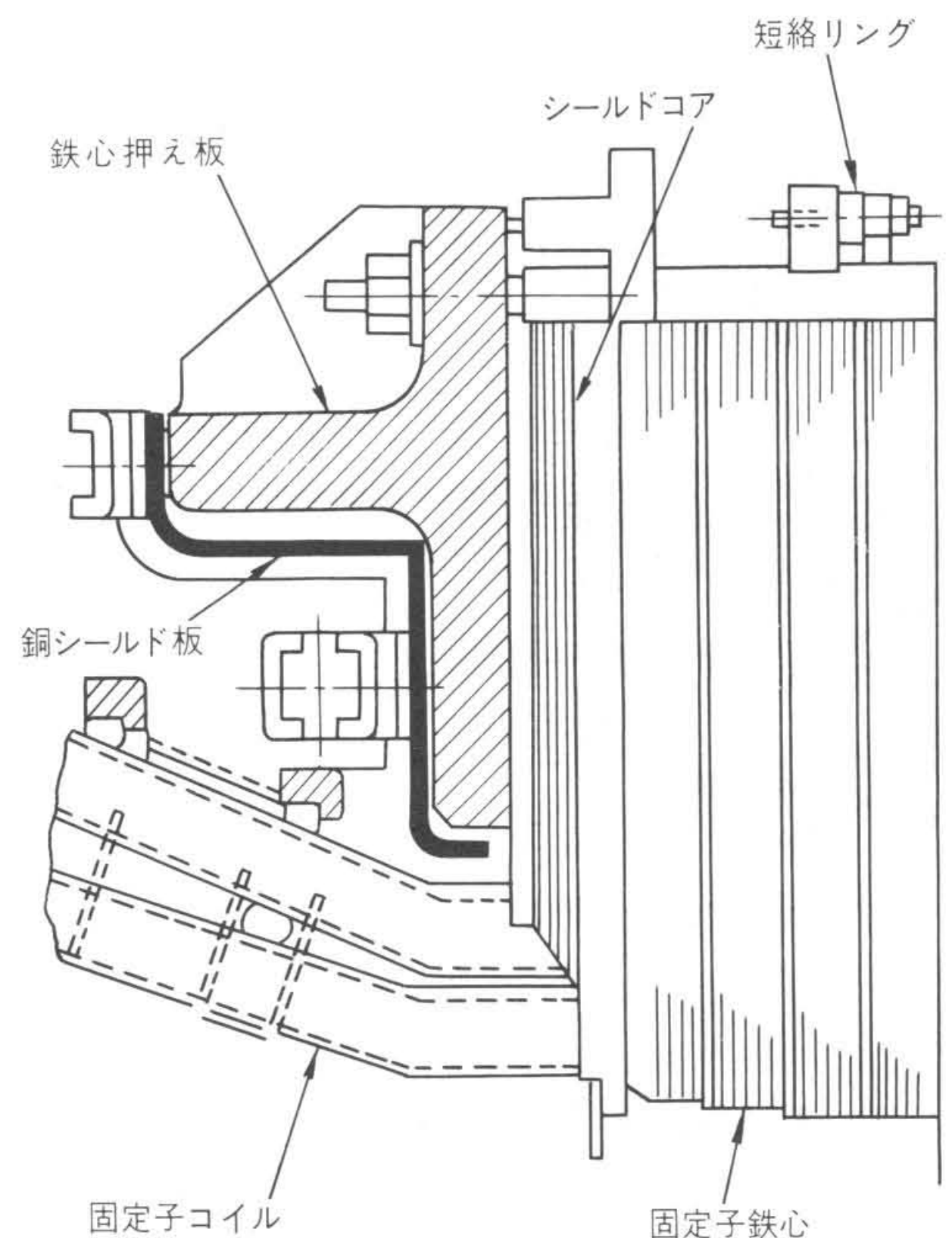


図8 固定子鉄心端部の構造と鉄心端部の磁束分布 シールドコアによる鉄心端部への軸方向に入射する磁束を抑制して、温度上昇の低減を図っている。また、鉄心端部のFEM(有限要素法)による詳細な電磁界解析は、漂遊負荷損を低減する最適構造決定に用いられている。

遷移温度が十分に低くじん性の高いNi-Mo-V鋼を採用しており、厳重な品質管理のもとに信頼性の高いものとなっている。界磁コイルは銀入り銅としてクリープ強度を高め、絶縁物も耐摩耗性の高いエポキシ樹脂含浸ガラス繊維積層板とし、また固定子巻線の場合と同様に、負荷の大小に伴う熱伸縮に柔軟に対応できるように、端部の保持環絶縁物の内側には特殊なコーティングを施してある。界磁コイルはラジアルフロー直接水素ガス冷却方式を採用しているが、従来よりも通風ピッチを短くして冷却効果を改良したショートピッチラジアルフローを採用している。図9に界磁コイルの冷却通風図を示すが、本方式の採用により界磁コイルの温度上昇を十分低く抑え、負荷の変化に伴う熱的な軸振動の変化に対する裕度の確保を図っている。また、回転子冷却ファンにはファン効率の高いラジアルファンを採用し、高効率化を図っている。更に、運転性能の向上策として全長ダンパを採用しており、逆相耐力の向上を図っている。

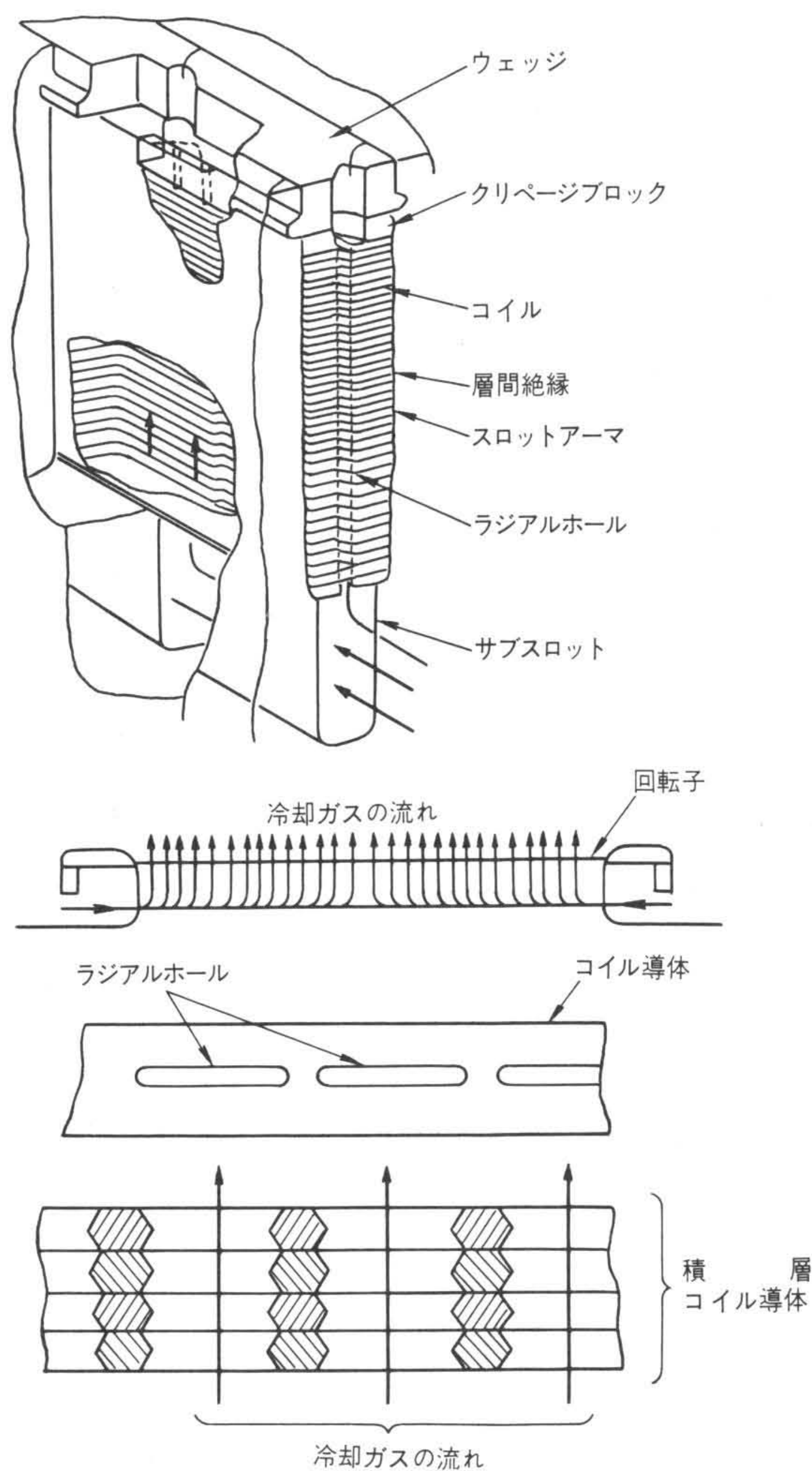


図9 改良形ラジアルフロー水素ガス直接冷却界磁コイル 従来よりもラジアルホールのピッチを短くしたショートピッチラジアルフローにより、界磁コイルの冷却効果を高めている。

9.3 次期1,300MVAタービン発電機の特徴

以上、福島第二・2号タービン発電機の特徴について述べたが、現在同発電所4号タービン発電機を据付け中である。2号機の励磁方式が直結交流励磁機によるコミュテータレス方式であったのに対し、4号機ではサイリスタによる分巻自動静止形超速応励磁方式を採用しており、本励磁システム採用の中では最大級のものとなっている。

最近の電源立地難から、電力需要地から遠隔地の発電所建設を余儀なくされており、発電機の単機容量も主として経済的理由から増大する傾向にある。このため大容量長距離送電化が進み、系統安定度の確保が以前にも増して重要になってきている。

系統安定度の向上策としては、直列コンデンサの挿入、中間調相設備、タービン高速バルブ制御など種々の方法が考えられているが、発電機励磁装置の速応性能を高める方法、超速応励磁方式は最も実現性のある方法の一つと考えられ、4号機用タービン発電機には本方式を採用している。

10 結 言

以上、原子力用蒸気タービン・発電機の主な特徴について説明した。この大容量化・大型化により種々の新技術が取り入れられているが、これらの技術は従来機の実績を十分反映して安全性・信頼性の優れたものになっている。

表4 福島第二・2号機の試運転記録 1,100MW初出力の早期達成及び計画値を満足する運転データは、タービン発電機の高い信頼性を示している。

(a) 実績工程

項 目	年 月 日
初 通 気	昭58・5-26
初 併 入	昭58・6-23
初めて $\frac{1}{4}$ 負荷をとった日	昭58・6-23
初めて $\frac{2}{4}$ 負荷をとった日	昭58・7-22
初めて $\frac{3}{4}$ 負荷をとった日	昭58・8-21
初めて $\frac{4}{4}$ 負荷をとった日	昭58・9-29
営 業 運 転 開 始 日	昭59・2-3

(b) 負荷遮断試験結果

負 荷	実 施 日	最大速度上昇率(%)
$\frac{1}{4}$	昭58・7-7	+3.33
$\frac{2}{4}$	昭58・8-12	+3.13
$\frac{3}{4}$	昭58・9-26	+4.73
$\frac{4}{4}$	昭58・10-19	+6.20

(c) 性能試験結果(タービンプラント効率)

負 荷	実 施 日	計画値(%)	実測値(%)
$\frac{4}{4}$	昭58・12-6	33.65	34.06

(d) 軸振動、軸受給排油温度、軸受メタル温度実測値 (昭59-11-14測定)

軸受No.	軸 振 動 ($\frac{1}{1,000}$ mm)	軸 受 温 度(℃)		
		給油温度	排油温度	メタル温度
1 (HP)	21	45	52	62
2 (")	32	45	51	62
3 (LP)	32	45	52	64
4 (")	49	45	52	67
5 (")	42	45	52	65
6 (")	52	45	52	66
7 (")	36	45	52	66
8 (")	23	45	52	65
9 (GFN)	23	45	52	65
10 (")	21	45	52	62
11 (")	17	45	49	55
12	36	45	49	53
13	8	45	48	50
スラスト軸受	(前)	45	55	61
	(後)	45	56	60

本機は、試運転開始以来好調裏に運転を続け、性能試験でも計画値を十分満足した結果が得られている。表4にその試運転記録を示す。

今後とも、この貴重な経験及び実績を生かし、より信頼性の高い設計、製作を行なってゆく考えである。

参考文献

- 1) 久野，外：原子力用タービン発電機の最近の動向，日立評論，56，9，889～894(昭49-9)
- 2) 相馬，外：大容量原子力タービン用汽水分離器の開発，日立評論，57，5，409～414(昭50-5)
- 3) 実松，外：最近における大容量タービン発電機の新技術，日立評論，62，4，268～272(昭55-4)
- 4) 花田，外：556MVAタービン発電機の完成，日立評論，64，7，533～538(昭57-7)
- 5) 丹羽，外：最近におけるタービン発電機の新技術，日立評論，64，10，763～768(昭57-10)