富士電機におけるタービン発電機の開発の現状

特集

日和佐 寛道（ひわさ　ひろみち）　長谷　徹（はせ　とおる）　芳賀　弘二（はが　こうじ）

1　まえがき

近年，2極空気冷却タービン発電機の大容量化が求められている。10年ほど前は，150 MVA程度のタービン発電機には水素冷却発電機が用いられていたが，現在では200 MVAを超える容量に対しても空気冷却発電機が適用されている。

一方，コンバインドサイクル発電プラントでは，一軸型や多軸型の蒸気タービンと連結する発電機の容量は400 MVAクラスになり，固定子水素直接または水直接冷却方式の発電機が採用されている。400 MVAクラスには，経済性，保守性，運転性に関する顧客ニーズから，固定子水素間接冷却方式の発電機（以下，水素間接冷却機と記す）が採用されている。富士電機は，空気冷却機では300 MVA，水素間接冷却機では450 MVAまで全含浸絶縁（109ページの「解説」参照）システム（Fレジン/GⅡ）を採用した発電機を開発し，系列化している。以下に，これら系列化過程における技術開発の概要，重要な開発項目である大容量高電圧全含浸絶縁システムの開発および製造自動化技術について述べる。

2　大容量空気冷却発電機の実用化

空気冷却発電機は水素冷却発電機に比べ，構造がシンプルであり，水素ガスや密封油などの補機系統がないため短期間での据付けが可能で，運転およびメンテナンスが容易であり，製作期間も短い。初期投資額が低い点も利点である。富士電機では1999年に試作した126 MVA試作実験機での検証[(1)～(4)]を基に，空気冷却機の大容量化に取り組み，50 Hz，280 MVAの空気冷却発電機を実用化した。**図1**，**図2**に全景と構造断面図を示す。

2.1　技術的特徴

固定子巻線には間接冷却方式を，回転子巻線には半径方向直接冷却方式を採用しており，固定子枠側面に空気冷却器（クーラ）を配置している。回転子は，基礎台板上に設置された2個の軸受台で支持されており，反駆動機側には励磁装置が設けられている。

図1　280 MVA空気冷却タービン発電機

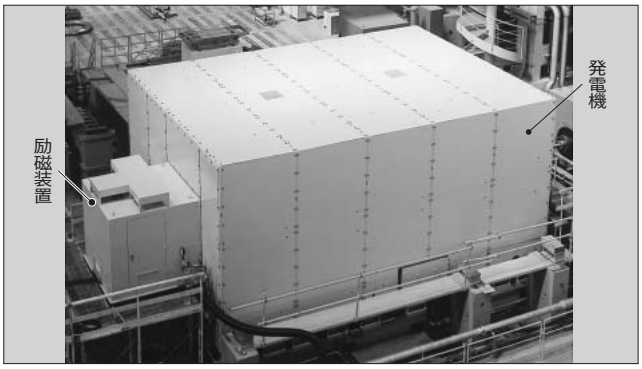
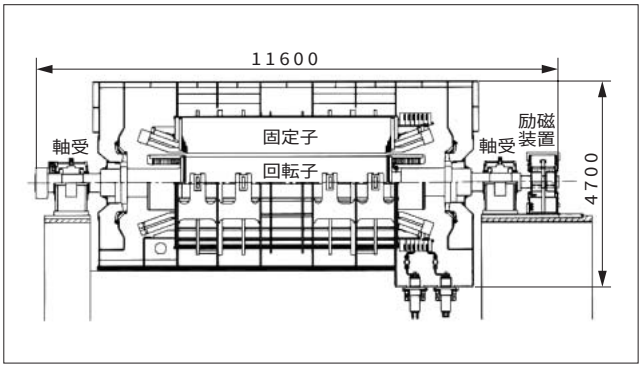


図2　280 MVA空気冷却タービン発電機断面



固定子巻線には，コイルを固定子鉄心に挿入し，端部の結線が完了した後に，固定子全体に対してエポキシ樹脂含浸を行う全含浸絶縁システムを採用している。

空気冷却発電機の大容量化を進める過程において，下記の解析・評価技術を用いて性能を確認している。

(1)　熱流体解析による固定子および回転子巻線温度の評価
(2)　電磁界解析による漂遊負荷損の解析
(3)　強度解析による回転子疲労強度評価

日和佐 寛道

大型回転機の設計・開発に従事。現在，富士電機システムズ株式会社発電プラント本部川崎工場回転機部課長補佐。電気学会会員。

長谷　徹

大型回転機の設計・開発に従事。現在，富士電機システムズ株式会社発電プラント本部川崎工場回転機部課長。

芳賀　弘二

回転機絶縁の開発に従事。現在，富士電機システムズ株式会社発電プラント本部川崎工場回転機部担当課長。電気学会会員。

表１　280 MVA空気冷却タービン発電機の工場試験結果

仕様	出　力	280 MVA
	電　圧	14.7 kV
	電　流	10,997 A
	力　率	0.9
	回転速度	3,000 r/min
	周波数	50 Hz
	耐熱クラス	155（Fクラス）
	冷媒温度	40 ℃
	励磁方式	サイリスタ励磁方式
	適用規格	IEC60034-3
工場試験結果	固定子巻線温度上昇	≦81 K
	回転子巻線温度上昇	≦80 K
	短絡比	0.52
	直軸過渡リアクタンス	26.7％　不飽和値
	直軸初期過渡リアクタンス	20.1％　不飽和値
	効　率	98.82％　規約効率

2.2　280 MVA 空気冷却発電機の工場試験結果

前述の 50 Hz 280 MVA 空気冷却発電機では定格出力における工場試験（商用試験）だけではなく，型式定格条件においても無負荷飽和特性，三相短絡特性，損失測定，温度上昇試験などを実施した。この発電機の型式定格における仕様と試験結果を**表１**に示すが，いずれも仕様値を満足しており良好であった。また，特殊試験として，回転子巻線温度分布，固定子巻線軸方向温度分布，固定子振動を測定し，設計値や実績値との比較，評価を実施した。これらの結果から，この発電機が優れた特性，高い性能，および高い信頼性を有していることを確認した。

3　水素間接冷却機の大容量化技術

固定子巻線に全含浸絶縁システムの適用を実現した 400 MVA クラスの水素間接冷却発電機を開発した。代表例として，450 MVA 発電機の断面を**図３**，仕様を**表２**に示す。

開発にあたっては，経済性，保有技術および製造設備の面から，下記事項を折り込むこととした。

(1)　全含浸絶縁システム適用の最大出力機とする。

(2)　回転子と固定子は，それぞれ空気冷却機と同一構造あるいは同一製作方法とする。

(3)　後述する回転子コイル 4 隅ろう付け装置などの最新設備を最大限に活用する。

3.1　構　造

400 MVA クラスの水素間接冷却機は空気冷却機に比べ，冷媒に水素を用いることから固定子枠が圧力容器である点，また，ブラケット方式の軸受支持構造を採用している点が異なるが，固定子，回転子ともに基本的に空気冷却機と同一の構造かつ製造方法である。

図３　450 MVA 水素間接冷却タービン発電機断面

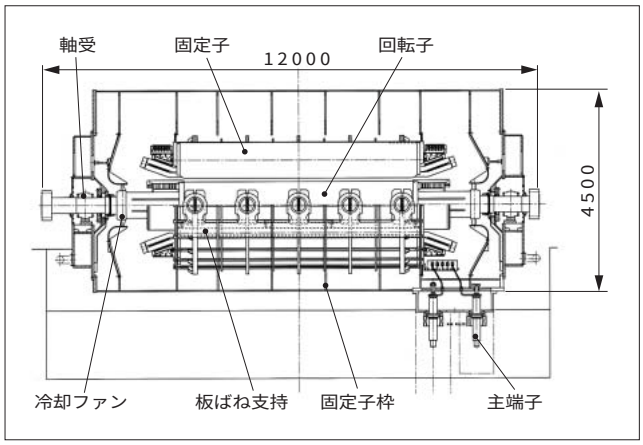


表２　450 MVA水素間接冷却タービン発電機の仕様

出　　力	450 MVA
電　　圧	21 kV
電　　流	12,372 A
力　　率	0.85
回転速度	3,600 r/min
周　波　数	60 Hz
耐熱クラス	155（Fクラス）
冷媒温度	40 ℃
冷媒圧力	400 kPa（g）
励磁方式	サイリスタ励磁方式
適用規格	IEC60034-3

また，固定子巻線には空気冷却機と同様に，富士電機の主要技術である全含浸絶縁システムを採用した。これを実現するためには，全含浸絶縁システムの高電圧へ対応が不可欠である。この技術開発については4章で詳細を述べる。

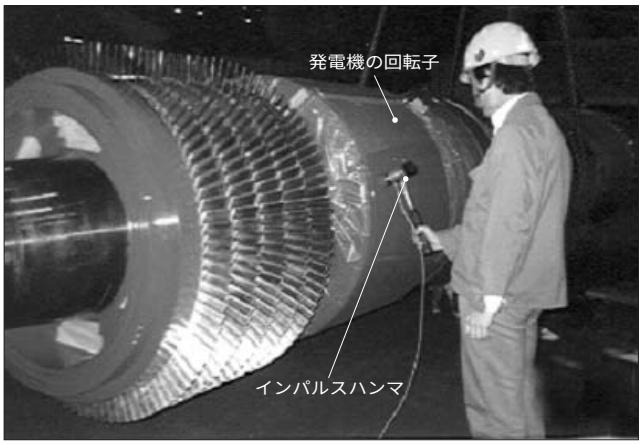
全含浸後，完成した固定子を圧力容器である円筒状の固定子枠に挿入し，板ばねを介して固定子枠に固定する。この板ばねと固定子および固定子枠との接続は，大型空気冷却機と同様に溶接方式を採用した。

回転子巻線は空気冷却機と同様に半径方向直接冷却方式を採用しているが，界磁電流が大きいためコイル導体厚みが増す。コイル導体の通風冷却穴の加工は空気冷却機では経済性を高めるために打抜き加工を採用しているが，水素間接冷却機においては，導体打抜き部の変形や設備能力などの要因から，そのままでは適用できない。型クリアランスやコイルの断面形状など，種々の検討課題をクリアして，打抜き加工を実現した。

3.2　通風冷却

大容量空気冷却機では，複流通風と呼ぶ通風方式を採用している。この方式は固定子巻線温度の均一化を図るため，鉄心中央部へは冷却風を外径側から送り込む方式である。一方，水素は密度が小さく熱容量が大きいため，ファンおよびギャップ通過時の冷媒温度上昇は空気に比して小さく

図４　長大回転子の打撃試験



なる。したがって，450 MVA 水素間接冷却機では，固定子鉄心の内径側から外径側へのみ冷媒を流す単流通風と呼ばれる通風回路を採用した。なお，軸方向における冷媒の風量を適正にするために，前述の 126 MVA 試作実験機で検証した解析技術により最適な鉄心ブロックの厚みと分布および回転子コイルの冷却穴の軸方向分布を決定した。

3.3　長大回転子の振動低減

容量の増大に伴い回転子は軸方向に長くなり，軸振動は質量アンバランスや軸断面の非対称性の影響を受けやすくなる。したがって，振動面で十分な検討が必要となる。

バランス調整作業では低減できない軸断面の非対称性に起因した 2 倍波サイクル振動を確認するため，**図 4** に示すように打撃試験にて軸断面の断面二次モーメントの主軸方向の固有値を求め，非対称性を解析結果と比較して，軸剛性の断面非対称性を防止する回転子磁極部の補償スリットの設計に反映した。

4　固定子巻線絶縁技術

富士電機ではこれまで長年蓄積した全含浸絶縁技術と世界屈指の全含浸製造設備を用いて，1993 年にタービン発電機へ全含浸絶縁を適用し，以来，約 100 台の適用実績を上げている。前述した水素間接冷却機の大容量化に伴い，発電機電圧は高くなるので絶縁品質の安定化が全含浸絶縁に求められる。そこで，定格電圧 22 kV 級のタービン発電機にも対応できる全含浸絶縁システムを開発した。

4.1　タービン発電機用全含浸絶縁の特長

全含浸絶縁システムでは，固定子巻線と鉄心が含浸樹脂で一体化されていることから固定子巻線の冷却性能向上，緩みに対する信頼性の向上，それに付随するメンテナンスの低減などの利点を有している。全含浸絶縁固定子の外観を**図 5** に，固定子断面を**図 6** に示す。このタービン発電機用全含浸絶縁には，絶縁信頼性を確保する観点から，次の絶縁技術を採用している。

(1)　高耐熱性エポキシ樹脂

図５　全含浸後の発電機固定子の外観（280 MVA）

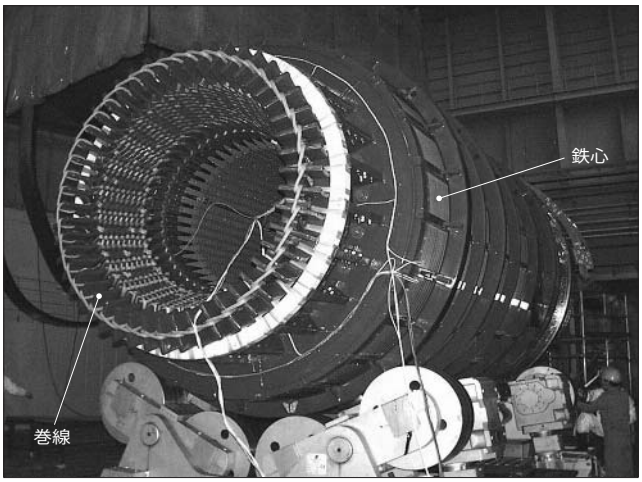
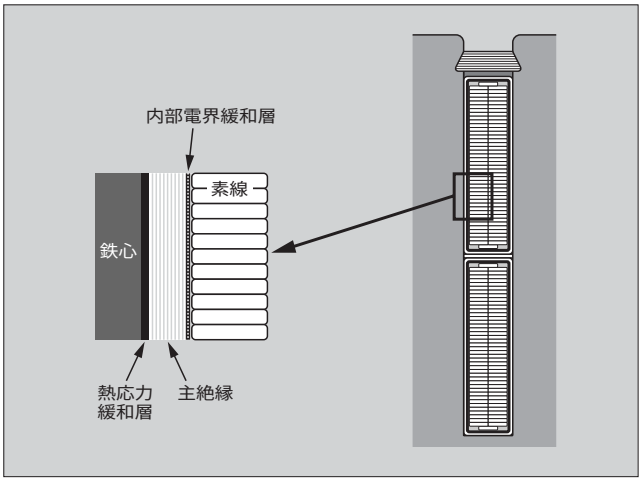


図６　固定子コイルの断面



(2)　高含浸性集成マイカテープ

(3)　高耐電圧寿命対応の内部電界緩和層

(4)　高耐ヒートサイクル性対応の熱応力緩和層

4.2　タービン発電機用 22 kV 級全含浸絶縁の開発

400 MVA クラスの水素冷却機に適用される 22 kV 級全含浸絶縁の開発においては，これまでの固定子コイルに比べ，コイルが長尺で絶縁が厚くなり耐電圧試験値が上昇する。このことから，特に主絶縁層のテーピング性，含浸性，エンドコロナ防止の信頼性，および全含浸絶縁コイルの絶縁信頼性評価に注目して開発を行った。

4.2.1　主絶縁テーピングの解析

固定子コイルの絶縁層は集成マイカの主絶縁テープを巻いて製作するが，絶縁特性は，テープの巻き方，テープ厚さや幅寸法によって影響される。例えば主絶縁テープの重ね目の状態などによってもコイルの絶縁破壊電圧値が変わるため，同一巻層数で最大の絶縁破壊電圧値を得る必要がある。このためテーピングの最適条件を求めるためのプログラムを完成させ，解析を行っている。解析では，運転電圧や耐電圧試験において固定子コイル絶縁断面の角部に電界が集中するため，テーピングの際には，この部分のテー

図７　往復巻き 22 kV モデルの等層分布図
（絶縁表面から見た重なり層数）

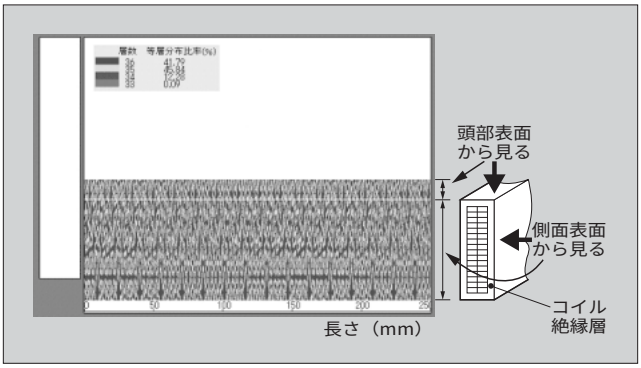
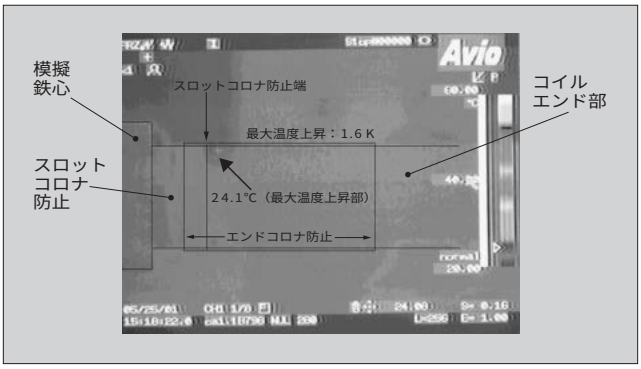


図８　22 kV エンドコロナ防止の表面温度分布



ピング重なり層数が少なくなることを避けなければならない。22 kV 級絶縁でのテーピング解析結果を**図７**に示す。コイル角部でのテーピング重なり層数が多く，規則性のある状態でテーピングされていることが確認できた。この結果を 22 kV コイルのテーピングに反映させた。

4.2.2　エンドコロナ防止の温度分布

固定子コイルのエンド部分にはコイルエンドからの電位傾度を緩やかにする目的でエンドコロナ防止層が設けてある。今回この 22 kV 級絶縁でエンドコロナ防止層の温度分布の定量化を行った。常規対地電圧印加時でのエンドコロナ防止層の温度分布を**図８**に示す。最大温度上昇部分はスロットコロナ防止端近傍であり，表面電位測定結果と合致している。さらに最大温度上昇は 1.6 K と小さな値であった。また，耐電圧試験〔$2E+1$，E：定格電圧（kV）〕においてもせん絡や表面発光などの異常発生も認められず，22 kV 級絶縁のエンドコロナ防止層は十分な機能を有していることを確認した。

4.2.3　絶縁信頼性評価

絶縁信頼性評価は直線モデルバーと実機大モデルを製作して行った。22 kV 級絶縁の直線モデルバーでは耐ヒートサイクル試験と耐電圧寿命試験を行い，ヒートサイクルの安定性と高耐電圧寿命を有していることを確認した。さらに絶縁製法を含めた信頼性を確認するため，**図９**に示す実機大モデルを製作した。実機大モデルは 450 MVA 水素間接冷却機を想定したものであり，積層鉄心長 4.5 m，スロット数 5 である。固定子コイル挿入およびエンド縛りや

図９　22 kV 実機大モデルの外観

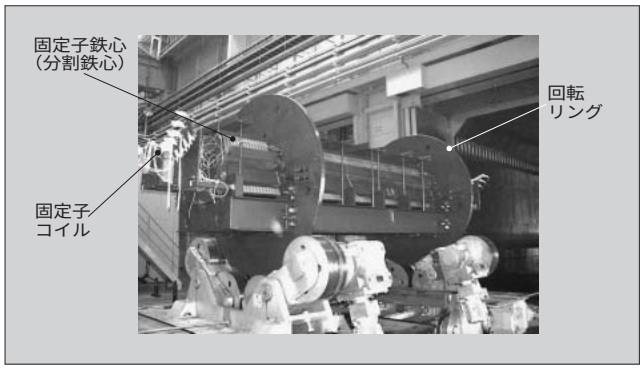
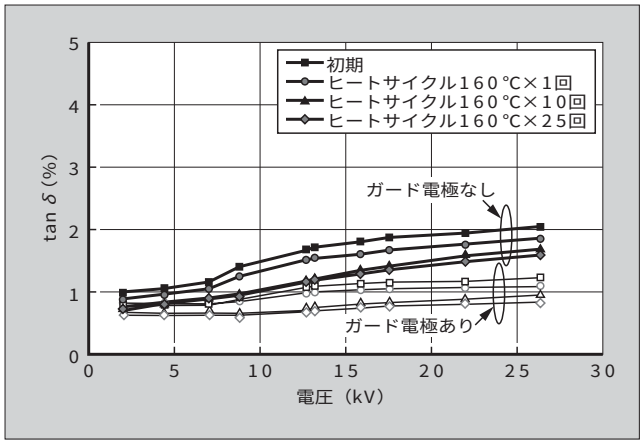


図10　22 kV 実機大モデルのヒートサイクル時の tan δ-電圧特性



全含浸処理作業を忠実に行うため，鉄心には回転リングを取り付け，真空加圧含浸後，回転硬化できる構造とした。

実機大モデルは，製作初期において（$2E+1$）kV の耐電圧試験を行った後，ヒートサイクル試験を 25 回行った。ヒートサイクル時の tan δ-電圧特性を**図10**に示す。tan δ特性は初期から 25 回まで変化が少なく，絶縁特性が安定していることを確認した。さらにヒートサイクル 25 回後，気中にて絶縁破壊試験を実施して破壊電圧値が，定格電圧の 3 倍以上（気中せん絡）を有していることを確認した。

5　製造自動化技術

タービン発電機では短納期，低価格および品質の安定性に対する市場要求が顕著である。これらの要求を満足させるために製造工程の自動化・機械化の技術開発を行い，実用化したので，その一端を紹介する。従来，技能者のスキルに大きく依存していたが，製造工程への自動化・機械化の導入により，品質の安定性を図ることが可能となる。

5.1　回転子コイル自動ろう付け装置

回転子コイルの製作作業では，これまで人手で銅バーをろう付けしていた。開発した自動ろう付け装置を**図11**に示す。銅バーを高周波ろう付け機で連続的にろう付けし，仕

図11　自動ろう付け装置

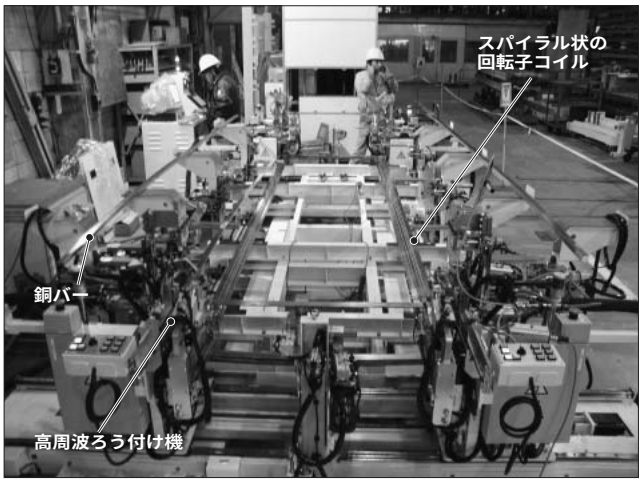


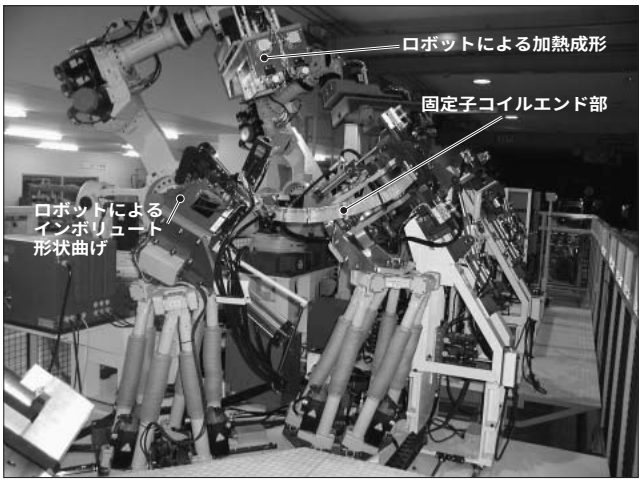
図12　自動素線編み機

上げを行い，スパイラル状の回転子コイルを製作する装置である。人手で行っていたろう付け作業を自動機に置き換えるため，高周波加熱時の温度やろうを挿すタイミングなどを計測し，材料強度とろう付け部の断面分析などの関係から自動機の条件設定を決定した。[5] さらに，回転子コイルの銅バー寸法が異なる場合には，製作前にサンプルを製作して強度試験を行い，条件設定が適切であるかを確認し，品質確保を行っている。

5.2　自動素線編み機

固定子コイルの素線は損失低減のためのレーベル転位，いわゆる素線編みがなされている。これまでは，素線切断，素線成形，編みなど作業パートごとに人手で行われていた。開発した自動素線編み機を**図12**に示す。自動編み機では，素線切断，素線端部の絶縁はぎ，素線成形，編み，絶縁挿入，素線束ねまでの一連の作業を自動化した装置である。自動編み機に素線電線および絶縁材料を投入すると素線編みがなされたコイルが出てくる装置であり，独自の編み機構を考案し，編みの均質性を実現している。

図13　コイルエンド自動成形機



5.3　コイルエンド自動成形機

固定子コイルのエンド部は人手によってコイルを曲げ，型にセットし，固め成形を行っていた。開発したコイルエンド自動成形機を**図13**に示す。コイルエンド自動成形機はロボットを用い，コイルエンド部のインボリュート形状曲げ，加熱成形，コイル端部導体切断までの工程を自動的に行うものである。インボリュート形状の均質化とリードタイムの短縮化を実現している。

さらに，最も重要な製造技術である全含浸処理作業では，使用する樹脂を厳しく管理し，含浸作業および回転硬化プロセスは自動で制御している。また，含浸プロセスではコイル絶縁層に確実に樹脂が含浸されていることを確認するため含浸モニタリングシステムを採用し，厳重な製造プロセス管理下で作業を行い，自動化とともに品質安定化に努めている。

6　あとがき

富士電機におけるタービン発電機の開発の現状を述べた。今後も技術開発により市場要求にマッチし，かつ，高品質・高信頼性のタービン発電機を製作していく所存である。

参考文献

(1)　小原孝志ほか．新系列 2 極空気冷却タービン発電機の熱および電気設計．富士時報．vol.72, no.5, 1999, p.267–270.
(2)　溝上良一ほか．新系列 2 極空気冷却タービン発電機の電磁界解析．富士時報．vol.72, no.5, 1999, p.271–274.
(3)　阿久津信雄ほか．新系列 2 極空気冷却タービン発電機の構造設計．富士時報．vol.72, no.5, 1999, p.275–278.
(4)　山本勉ほか．新系列 2 極空気冷却タービン発電機の通風冷却技術．富士時報．vol.72, no.5, 1999, p.279–282.
(5)　今村清治，南郷堅．大型製品の自動ろう付技術．溶接技術．2004 年 9 月号，p.71–76（2004）．

e-Front runners

＊本誌に記載されている会社名および製品名は，それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。