産業用回転機の現状と動向

*森下　悦明(もりした よしあき)

1　まえがき

回転電気機械（以下，回転機と略す）が産業用動力源などに用いられてから，おおよそ100年が経過した。この間，新材料，新解析技術，新しい製造技術などの周辺技術が適時取り入れられ，市場の要求にマッチした回転機が次々に開発され，産業界の発展に貢献してきた。

しかしながら，昭和48年に始まる石油危機以来，世の中のすう勢は，省エネルギー，省資源，省力，省保守を志向し，産業用回転機に対する要求にも大きな変化が生じた。

すなわち，駆動機械に最適な特性を有し，例えば超高速化，可変速化など高効率であり，信頼性に富み，しかも経済性を有する回転機が要求されることになった。

この要求を満足すべく電機業界は，電力用半導体素子を有効に利用して可変速化や超高速化を可能にし，また，有限要素法など新解析技術を導入し，より小さく，より軽く，かつより信頼性のある回転機を開発してきた。

以下に，回転機技術の動向と富士電機の回転機技術の変遷を述べる。

2　産業用回転機の技術動向

産業用回転機の将来の技術動向を推測するに当たり，主要機種の最近の需要動向，市場動向を探ってみる。

2.1　産業用回転機の市場動向

構造が簡単で堅ろうな誘導電動機は，小容量から大容量に至るまで，産業界の各種動力源として最も多く用いられている。ポンプ，ブロワ及びコンプレッサ駆動用の中大容量誘導電動機は，石油危機以降の国内産業界の停滞により需要は伸びていない。特筆すべきは，昭和50年代半ば以降に国外需要，特に中近東向けに多数の誘導電動機が輸出されたことである。このため，設置環境により，電動機本体，軸受とも大容量機に至るまで全閉外扇形（CACA）の空気冷却方式が要求されたり，防じん・防水構造として，最高レベルの保護構造（JP55）の要求，あるいは耐候性のよい塗装の要求など，特殊な要求が増加した。

また，火力補機用のボイラ給水ポンプあるいは循環水ポンプ駆動の誘導電動機には，DSS（Daily Start Stop）運用のため高い始動頻度の要求や環境問題から超低騒音（50 dB）の要求など，非常に厳しい仕様となっている。一方，省エネルギー，省資源の思想から，輸出向けについては誘導電動機に限らず，すべての回転機の高効率化の要求が増え，損失1kWを40～80万円として，初期コストだけでなく運転コストをも評価する場合が増えている。また，電力用半導体素子の発達による誘導電動機の可変速化が容易となったため，既設電動機の可変速化や新設可変速誘導機が増加している。

同期機に関しても，近年の経済の停滞は，その需要増大を阻んでいるが，比較的安い設備投資額で電力を得ることのできるディーゼル発電機は，中国や東南アジアから継続的に需要がある。省エネルギー・省資源の見地から，これら発電機に関しても高効率の要求が多いことはもちろんであるが，従来の400～1,000rpmの中高速4サイクルディーゼルエンジンに比較して，効率が高く低質油が使える低速2サイクルディーゼルエンジンが見直され，これに駆動されるディーゼル発電機の要求が増加している。この発電機の回転速度は100～200rpm（30～60極）で，出力としては30,000kVA程度の大形発電機となっている。また，この利点を応用して船の推進用ディーゼルエンジンから電力を得る軸発電装置が多数製作されている。

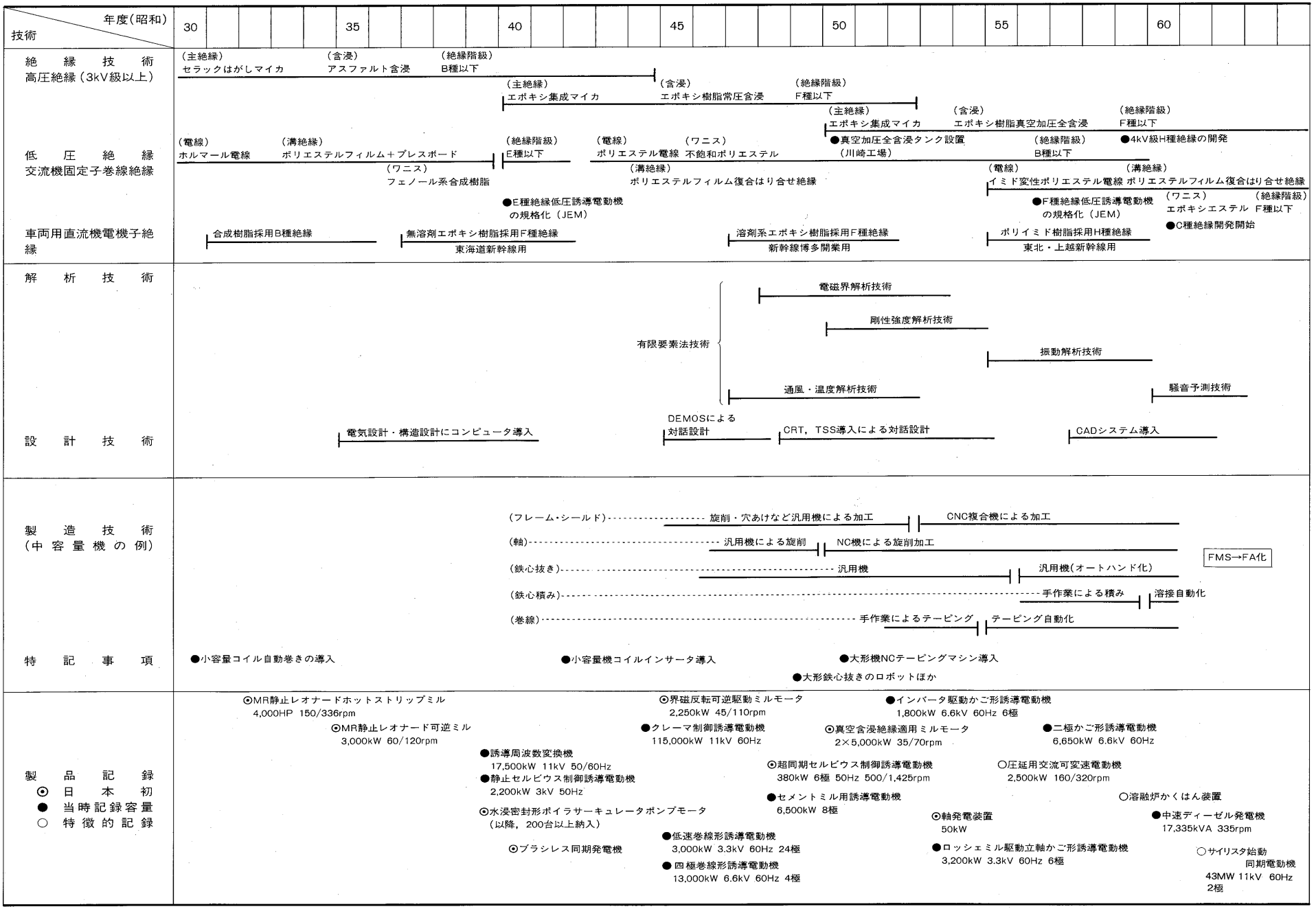
制御用途を中心とする小形電動機[1]は，家電製品，音響機器や各種産業における生産自動化機器等々の動力源として用いられ，その需要は年々増加しており，一般誘導電動機を主体とする交流電動機を上回るほどである。これら小形電動機の種類は，直流サーボモータ，ステップモータ，ブラシレス直流モータ及び交流サーボモータなどであり，特に交流サーボモータとしてのベクトル制御誘導電動機方式は，1kW以上の容量向きで，主に工作機械（主軸駆動用）やロボットに用いられている。この主軸駆動工作機械用電動機に要求される機能は，広い可変速範囲，高加減速特性，高回転精度などであるが，ベクトル制御誘導電動機方式の採用により，直流サーボモータと同等の性能が可能となっている。なお，超高速超精密加工のニーズに対し，パワートランジスタの高周波インバータによる最高回転速度90,000rpmの主軸駆動用電動機なども製作されている。

一方，可変速電動機として長く使用されていた直流機は，主に車両用及び金属圧延用に用いられていたが過去の10年間を見ると，その需要はほぼ横ばいである。しかし，直流機の制御性能の良さにより，今でも利用される場合がある。

近年の交流可変速化技術の発達に伴い，直流電動機は交流可変速機に転換されつつある。これは，ベクトル制御により回転速度制御精度が直流機と同等となったこと，直流機より慣性モーメントを小さくすることが可能なために速度応答性が良いこと，整流子とブラシがないブラシレスとなりメンテナンスフリーであること，交流可変速機には直

*川崎工場 設計部

表 1　回転機技術の変遷


年度(昭和)
技術
30
35
40
45
50
55
60
絶縁技術
高圧絶縁(3kV級以上)
(主絶縁) セラックはがしマイカ
(含浸) アスファルト含浸
(絶縁階級) B種以下
(主絶縁) エポキシ集成マイカ
(含浸) エポキシ樹脂常圧含浸
(絶縁階級) F種以下
(主絶縁) エポキシ集成マイカ
(含浸) エポキシ樹脂真空加圧全含浸
(絶縁階級) F種以下
●真空加圧全含浸タンク設置 (川崎工場)
●4kV級H種絶縁の開発
低圧絶縁
交流機固定子巻線絶縁
(電線) ホルマール電線
(溝絶縁) ポリエステルフィルム＋プレスボード
(ワニス) フェノール系合成樹脂
(絶縁階級) E種以下
(電線) ポリエステル電線
(ワニス) 不飽和ポリエステル
(溝絶縁) ポリエステルフィルム復合はり合せ絶縁
(絶縁階級) B種以下
(電線) イミド変性ポリエステル電線
(溝絶縁) ポリエステルフィルム復合はり合せ絶縁
●E種絶縁低圧誘導電動機の規格化(JEM)
●F種絶縁低圧誘導電動機の規格化(JEM)
(ワニス) エポキシエステル
(絶縁階級) F種以下
●C種絶縁開発開始
車両用直流機電機子絶縁
合成樹脂採用B種絶縁
無溶剤エポキシ樹脂採用F種絶縁
東海道新幹線用
溶剤系エポキシ樹脂採用F種絶縁
新幹線博多開業用
ポリイミド樹脂採用H種絶縁
東北・上越新幹線用
解析技術
有限要素法技術
電磁界解析技術
剛性強度解析技術
振動解析技術
通風・温度解析技術
騒音予測技術
設計技術
電気設計・構造設計にコンピュータ導入
DEMOSによる対話設計
CRT, TSS導入による対話設計
CADシステム導入
製造技術
(中容量機の例)
(フレーム・シールド)
旋削・穴あけなど汎用機による加工
CNC複合機による加工
(軸)
汎用機による旋削
NC機による旋削加工
FMS→FA化
(鉄心抜き)
汎用機
汎用機(オートハンド化)
(鉄心積み)
手作業による積み
溶接自動化
(巻線)
手作業によるテーピング
テーピング自動化
特記事項
●小容量コイル自動巻きの導入
●小容量機コイルインサータ導入
●大形機NCテーピングマシン導入
●大形鉄心抜きのロボットほか
製品記録
⊙日本初
●当時記録容量
○特徴的記録
⊙MR静止レオナードホットストリップミル 4,000HP 150/336rpm
⊙MR静止レオナード可逆ミル 3,000kW 60/120rpm
⊙界磁反転可逆駆動ミルモータ 2,250kW 45/110rpm
●インバータ駆動かご形誘導電動機 1,800kW 6.6kV 60Hz 6極
●クレーマ制御誘導電動機 115,000kW 11kV 60Hz
⊙真空含浸絶縁適用ミルモータ 2×5,000kW 35/70rpm
●二極かご形誘導電動機 6,650kW 6.6kV 60Hz
●誘導周波数変換機 17,500kW 11kV 50/60Hz
●静止セルビウス制御誘導電動機 2,200kW 3kV 50Hz
⊙超同期セルビウス制御誘導電動機 380kW 6極 50Hz 500/1,425rpm
○圧延用交流可変速電動機 2,500kW 160/320rpm
●セメントミル用誘導電動機 6,500kW 8極
○溶融炉かくはん装置
⊙水浸密封形ポイラサーキュレータポンプモータ (以降, 200台以上納入)
⊙軸発電装置 50kW
●中速ディーゼル発電機 17,335kVA 335rpm
⊙ブラシレス同期発電機
●低速巻線形誘導電動機 3,000kW 3.3kV 60Hz 24極
●四極巻線形誘導電動機 13,000kW 6.6kV 60Hz 4極
●ロッシェミル駆動立軸かご形誘導電動機 3,200kW 3.3kV 60Hz 6極
○サイリスタ始動同期電動機 43MW 11kV 60Hz 2極

流機にみられる整流による容量製作限界がないこと，及び可変速化が省エネルギー・省資源の思想に合致していることがその理由である。具体的には，大形圧延機用の大容量低速直流機は，サイクロコンバータ交流可変速機へ，また工作機械用直流機などの小容量機もトランジスタインバータの出現により，かご形誘導電動機へ転換されている。
交流可変速機は，トルクリプルあるいは電源へ与える高調波などの問題を解決しながらその市場を拡大しよう。

2.2　産業用回転機の技術動向

産業用回転機に限らず，回転機発達の経緯は，初期においては，小形軽量化及び単機容量増大化であった。これら市場の要求に対し，回転機業界はあらゆる周辺技術を取り入れ，それにこたえてきた。この傾向は，新素材の導入（例えば，高圧回転機に対してはH種絶縁の採用，低圧回転機に対してはC種絶縁の採用など）や，有限要素法，境界要素法などにみられる解析技術の一層の導入などにより，今後も追求されていくであろう。

また電力用半導体素子の目覚ましい発展と，電子制御技術の進歩は，産業用回転機の可変速化や高速化を可能にしたが，第一次石油危機以降の省エネルギー化のすう勢と相まってパワーエレクトロニクスと回転機の合体化，更に一体化により，可変速化及び高速化は更に進み，システムとしての効率向上に貢献するであろう。したがって，回転機ハードウェアに対しては電磁気的，構造強度的，振動剛性的，通風冷却的などの解析精度の向上が一層要求される。

一方，マイクロコンピュータの発達や各種センサ技術の目覚ましい発達，あるいは予防予知技術の発達は，回転機内部の状態監視を可能にし，回転機の完全無人保守化が進み，初期コストや運転コストだけでなく，メンテナンスコストも考慮したライフコストミニマムが達成されるであろう。

管理技術的には，電気設計や基本計画図及び各部品の製作図の自動作図などの，いわゆる狭義のCADの概念から，コンピュータ援用生産（CAM）あるいは試験（CAT）を結合した広義のCAD（CAEなどとも言われている）となって行くであろう。

また製造技術的には，近い将来のFA化にそなえ，FMS化（Flexible Manufacturing System）が進むであろう。

3　産業用回転機技術の変遷

富士電機は，優れた基礎技術を基盤にした回転機技術を有する西ドイツのシーメンス社と技術提携を結び，設計・製造技術の吸収を行い，常に市場のニーズにマッチした回転機をタイムリーに開発し，かつ納入後のアフタケアにも心掛け，その経験を製品に反映させ，より良い製品を作り上げてきた。

富士電機の回転機技術の発達並びに製品記録を振り返ってみた。**表1**に，富士電機の回転機技術の変遷と製品記録を示す。

3.1　絶縁技術

回転機の絶縁技術は，その信頼性だけでなく，経済性をも決定づける主要な回転機技術の一つである。この意味合いから，過去・現在及び将来においても常に研究されねばならないテーマである。

産業用高圧回転機の絶縁方式に関しては，昭和40年ころまではセラックワニスをバインダとした，はがしマイカ絶縁を主要絶縁材料とし，アスファルトコンパウンドを真空含浸する方式がA種絶縁からB種絶縁まで広く利用されていた。昭和40年を境に，優れた絶縁特性を持つマイカを主要絶縁とし，熱硬化性のエポキシ樹脂をバインダないし含浸用樹脂とする絶縁システムが出現し，絶縁的にも耐熱的にも信頼性の高い絶縁方式が達成できた。

更に数年後には，白コイル（post-cured coil）が挿入された鉄心全体を真空含浸タンクに入れ，熱硬化性の合成樹脂含浸する真空加圧全含浸方式が，大容量産業用回転機の含浸方式となった。

一方，低圧絶縁に関しても同様な変遷をたどっているが，高分子絶縁材料を早期に採用し，高圧絶縁より早く，B種化やF種化を達成している。車両用直流電動機の電機子絶縁として，現在は既にH種絶縁が一般化している。

このように産業用回転機の絶縁技術は，高分子化学の発達を有効に利用して，A種絶縁の採用が一般的であった昭和30年ころから現在に至るほぼ30年の間に，耐熱グレードにて40℃上昇し，現在ではF種絶縁やH種絶縁が採用されるほどの発展を見た。この絶縁技術の発達は，昭和30年代の回転機重量をおおよそ半分にするほどのものであり，信頼性のみならず経済性においても，市場のニーズを満たしている。

3.2　設計技術（解析技術）

市場が求めている信頼性と優れた特性を有し，しかも経済性の高い回転機を製作するために，優れた設計技術を有することは不可欠である。

昭和40年代半ばからのコンピュータの普及は，回転機の設計技術を大きく変革することになった。例えば，回転機内部の磁束分布を正確に把握することは，非常に重要なことであったが，過去の古典的な解析手法では，複雑な形状の回転機については解析が困難であった。しかし，有限要素法の出現により，複雑なものについても解析が可能となった。この有限要素法の計算手順が，コンピュータで処理しやすいという利点があるため，コンピュータハードウェアの発達と相まって，種々の現象の解析手法として利用されてきた。従来の古典的な方法では解析できなかった構造物の応力集中の様子や，磁束分布・温度分布及び流体分布の正確な把握が可能となり，過剰品質や過小品質を適正化することにより，回転機の信頼性と小形軽量化が可能となった。また，動的な剛性解析，すなわち振動解析に関しては，実測データを基にしたモーダル解析やSDM法が，昭和50年代半ばころから採用され始め，回転機の剛性最適化に

大きく貢献している。

一方，コンピュータの発達は日常の設計活動にも大きな変革をもたらした。従来は，手計算で行っていた種々の電気・構造計算が，第1段階として必要な情報をコンピュータにインプットすることにより，必要な結果が出てくる時代であり(昭和35年ころから)，第2段階としては，中央コンピュータセンターの大形コンピュータに直結された端末機を，設計者の手元に分散して設置し，設計者が対話形式で設計を行う段階である(昭和45年以降)。このようなコンピュータの発達は，グラフィックディスプレイ端末機を用いた作図を可能にした。電気的計算や構造的計算と計画図・製作図などとの一体化が進み，いわゆるCAE (Computer Aided Engineering)への移行は，第3段階として，今後一層進むことが予想される。コンピュータの発展による設計技術の変革により，市場のニーズの多様化に迅速に対応が可能となった。

3.3 製造技術

高品質・高信頼性を有する回転機を製作するために，製造技術に最も要求されることは，同一図面のものをいつ製作しても同一の品質で製作でき，かつ早く製作できることである。このような意味合いで，過去の製造技術の変遷には，以下の三つの特徴がうかがえる。

第一は〝自動化〟である。これは小形電動機の巻線作業に象徴的にうかがえる。すなわち，誘導機が世に出て以来，固定子巻線はエナメル線を手巻きし，鉄心溝へ手作業にて挿入していたものが，昭和30年ころには自動巻きとなり，更に昭和40年ころからは，自動巻きされたコイルが，インサータにて鉄心溝へ自動的に挿入されるようになった。この傾向は高圧巻線についても同様で，テーピングマシンによる絶縁テープの自動巻きが採用され，大形回転機の鉄心抜き作業のロボット化などもこの好例である。

第二は〝複合化〟である。これは，例えば固定子枠（フレーム）の旋削や穴あけ，あるいは溝加工などの複数の作業を，コンピュータ数値制御（CNC）マシンにより，同一の機械で行うことである。**表1**には，中容量誘導電動機の製造技術の変遷を示す。

更に自動化又は複合化された機械を部品が製作される流れに沿って配列し，製作作業の流れをスムーズにしたライン化が第三の動きである。これらの方向は，その目的にあった精度の良い作業機械が製作されてはじめて達成できるものである。これらに対しても，CNCマシンに見られるコンピュータの発達，あるいは種々のセンサ技術，制御性の良いサーボモータの出現などが貢献している。

3.4 製品記録

表1には，回転機技術の進歩の記録として，年代順に製作当時（又は現在も）最大容量であった回転機あるいは画期的技術を採用した回転機を記載している。

富士電機が，日本最初のミル用直流電動機として，川崎製鉄(株)千葉製鉄所へ納入したMR静止レオナードホットストリップミル(4,000HP 150/336rpm)，神戸製鋼(株)へ納入したMR静止レオナード可逆ミル（3,000kW 60/120rpm)，日本鋼管(株)へ納入した界磁反転可逆駆動ミルモータ（2,250kW 45/110rpm）などは，鉄鋼業界のニーズをいち早くとり込み，富士電機が最初に製品化を達成したものである。

また誘導電動機としては，東京都水道局へ納入した当時日本最大容量の静止セルビウス制動誘導電動機（2,200kW 3kV 50Hz 12極）や，動力炉・核燃料開発事業団へ納入した日本初の超同期セルビウス制御誘導電動機（380kW 6極 500/1,425rpm)，あるいは当時のインバータ駆動として最大容量の1,800kW誘導電動機など，可変速化や省エネルギー化の市場のニーズにこたえて製品化を達成してきた。また省エネルギー化の好例として，船用軸発電装置が特記される。この装置は，ディーゼルエンジンの排ガスエネルギーを利用するものであり，富士電機は川崎重工業(株)と共同で装置を開発し，日本で初めて川崎汽船(株)「大和川」にこの装置を搭載した。その他，ボイラ循環水ポンプモータとして，200台にのぼる水浸密封形ポンプモータセットを納入し，ボイラの効率向上に貢献している。

その他，秩父セメント(株)に納入した6,500kW誘導同期電動機や，チッソ(株)に納入した誘導周波数変換機17,500 kW，宇部興産(株)へ納入したロッシェミル駆動立軸かご形誘導電動機などは，現在でも記録的容量である。

4 あとがき

このたびの「産業用回転機特集」では，富士電機の最近の回転機技術開発及びその成果である製品の代表例を各稿で紹介する。

産業界において，回転機は将来においても，その必要性及び重要性は不変である。現在の産業用回転機に要求されていることは，まことに厳しいが，あらゆる技術を傾注し，富士電機ではこのニーズを満足して行くつもりである。

この特集が需要家各位の御参考になることを期待する次第である。

参考文献

(1) 片岡昭雄：制御用小形電動機の最近の動向，電気学会雑誌，**106**，4，pp.289～291（1986）

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。