発電システムの変遷と今後の展望

電力システム製作所 副所長
中野直広

1. まえがき

我々の社会，経済活動を支える重要なインフラである電力システムは，電気を発生する発電システム，変電所・送電網で送電電圧を変換し各地に送る送変電システム，各需要家に電気を供給する配電システムの３システムで構成される（**図１**）。発電システムには，ダムで蓄えた水の落差のエネルギーを利用する水力発電，主として石油，石炭，天然ガスなどの化石燃料の燃焼エネルギーを利用する火力発電，原子力エネルギーを利用する原子力発電があり，近年，太陽光，風力などの再生可能エネルギーによる発電への取組みも進められているが，国内電力の多くを火力発電，原子力発電，水力発電で担っている。

20世紀初頭では，水力発電システムが日本の主電源であった。増加する電力需要に応え，水力発電システムは，大容量化が進められてきた。

20世紀中頃から発電の主力は，水力から火力へと移行し，火力発電システムの普及，大容量化が進められた。

20世紀後半には，高度成長期の電力需要増大に伴う設備の増設・大容量化への対応が進められてきた。

1970年代のオイルショック以降，石油依存体質からの脱却のため，揚水式発電の拡充，コンバインドサイクル発電などによる発電の高効率化，原子力発電の増設，稼働率向上に対応し，火力発電，原子力発電，水力発電のベストミックスによる電力の安定供給が進められた。また，太陽光，風力などの再生可能エネルギーによる発電への取組みも進められている。

本稿では，発電システムの構成要素の中で，火力発電システム，原子力発電システム，タービン発電機及び水力発電システムについて，技術の変遷と今後の展望について述べる。

2. 発電システムの技術の変遷

2.1 火力発電システム

火力発電は大容量化と高効率化の歴史の中で，汽力発電に加えコンバインドサイクル発電が多く採用されるようになってきた。発電方式やニーズの変化に対応して監視制御システムも進歩を遂げてきており，ここでは火力発電向け監視制御システムの変遷と将来動向について述べる（**図２**）。

2.1.1 火力発電方式の変遷

1960年代から，それまでの“水主火従”から“火主水従”の時代へ移行し，火力発電設備の増強，大容量化が進められた。1980年代からは需給調整火力の時代となり，ガスタービン発電と蒸気タービン発電を組み合わせたコンバインドサイクル発電の導入が進み，負荷変化や起動停止の容易性が求められるようになってきた。

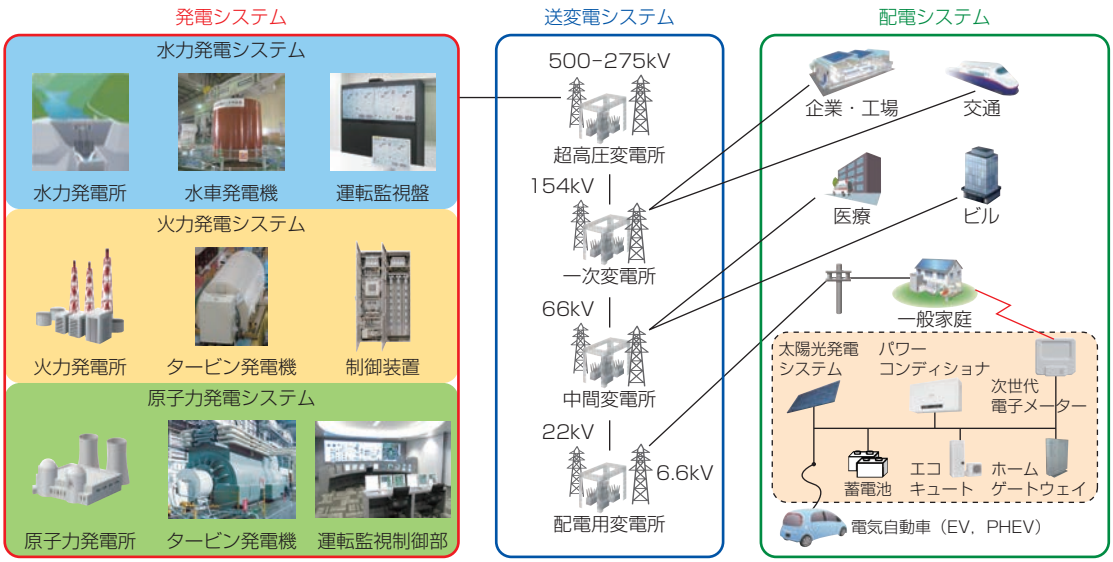


図１．電力システム

2. 1. 2　監視制御システムの変遷

1950年代は空気式計器を用いた現場手動操作であったが，1960年代に入ると電子式アナログ計装や電子計算機が導入され，火力発電向けにはデータロギング用途として1963年に“MELCOM330”を初号機として納入した。

1970年代に入ると高度経済成長の下，火力発電は大容量化が進展し，エレクトロニクス技術でもマイクロプロセッサの誕生など飛躍的な進歩があった。三菱電機もマイクロプロセッサを使用した計算機“MELCOM350－30，50シリーズ”を開発し，データロギング用途だけではなくタービン，ボイラのDDC(Direct Digital Control)制御として適用を開始した。

1980年代にはDSS(Daily Startup and Shutdown)運転など柔軟なプラント運用が求められるようになり，監視制御システムにも自動化機能などの高機能化が求められてきた。これらのニーズを受け，16ビットマイクロプロセッサを使用したデジタル制御装置“MELSEP700／500”を開発し，制御性，信頼性，保守性の向上を実現した。

計算機の役割も重要度を増すなか“MELCOM350－60シリーズ”を開発し，高速演算性能とリアルタイム性を実現して，自動化による省力化と柔軟なプラント運用に貢献してきた。

1990年代の高度情報化時代に入ると，従来のBTG(Boiler Turbin Generator)盤に代わりCRT(Cathode Ray Tube)での監視操作ニーズが高まり，CRTオペレーション装置“MELSEP2000”と制御装置“MELSEP500PLUS”を開発し，マンマシンインタフェースの充実，高速ネットワーク通信などデジタル技術の適用を大幅に拡大した。

2000年代には環境負荷低減の要求が高まり，ダウンサイジング，オープン化された仕様が求められ始めた。制御装置では従来比30～50％の盤面数削減を実現した“MELSEP550”を開発，計算機／CRTオペレーション装置では産業用パソコン，Linux(注1) OSを採用した“MELSEP2000S／C”を開発し，これらをシステムとして組み合わせ市場要求に応えてきた。

(注1)　Linuxは，Linus Torvalds氏の登録商標である。

2. 1. 3　最 新 技 術

制御装置の最新機種“MELSEP5”では，マルチコアプロセッサによる高性能化，CRTオペレーション装置との連携強化，ユニバーサルデザインの採用，さらに前機種とのハードウェア互換による部分更新など，環境負荷低減や省力化といった多様化するニーズに応えている。

2. 1. 4　将 来 動 向

今後も火力発電が電力供給の中核を担いながら，再生可能エネルギーの利用拡大とともに発電方式の多様化が進展すると予想されている。また，電力小売自由化や発送電分離によって需給制御やエネルギー貯蔵といった電力系統全体の最適運用に向けたニーズも拡大していくものと考える。監視制御システムでも，豊富なノウハウと最新のエレクトロニクス，IT技術を生かし，より高い運用性，制御性，省力化等多様化するニーズに応えていく。

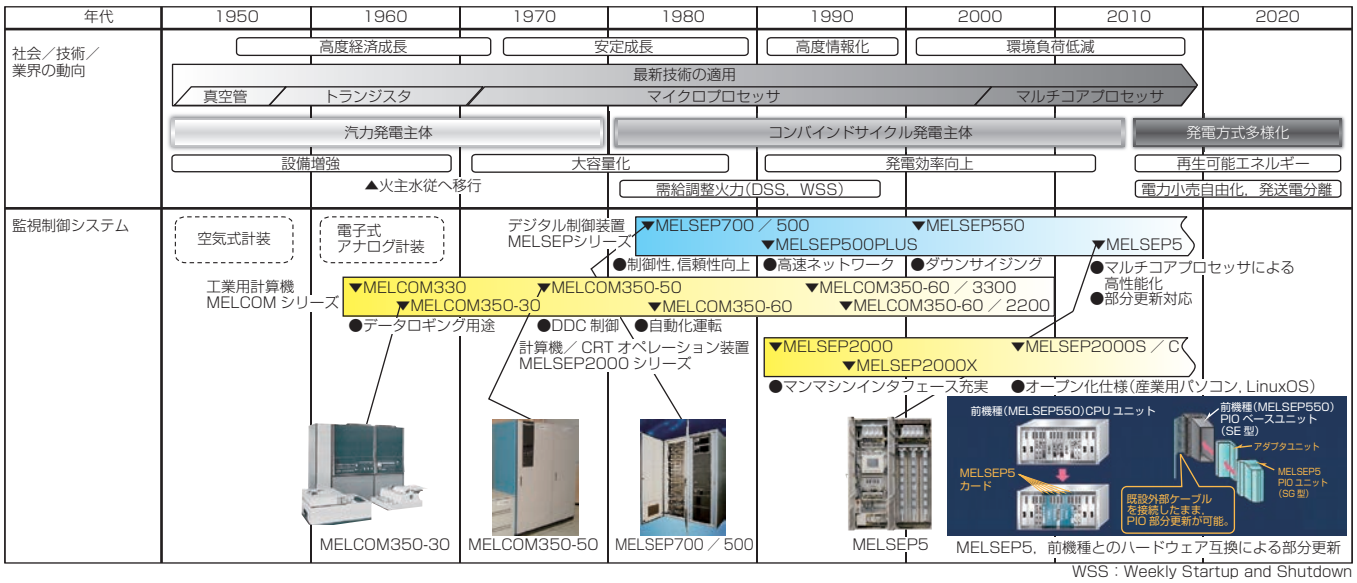
2. 2　原子力発電システム

当社は三菱グループとしてPWR(Pressurized Water Reactor)型原子力発電プラントの安全性・信頼性確保に対する社会要求に応えるため，特に電気計装分野を中心として，1960年代の黎明(れいめい)期から継続的に技術開発し，三菱重工業㈱と共同で，電力共同研究などを実施し，多くの製品を発電所に納入してきている。

ここでは，年代ごとに当社製品を支えてきた技術の変遷と，今後の取組みについて述べる(**図３**)。

2. 2. 1　第一世代：輸入と国産化

プラントの制御・保護システム，及び原子力特有機器である一次冷却材ポンプモータ，制御棒制御装置，電気ペネトレーション，放射線監視装置等は，初号機プラントでは，米国からの輸入品を中心に構成していた。当社は，その後



WSS：Weekly Startup and Shutdown

図２．火力発電システム技術の変遷

の継続プラントで，順次自社技術化を図るとともに，小型化などの設計改良を施してきた。

この当時，制御・保護システム等は，ボックス型計器，アナログカードで構成しており，また計算機はプラントの全体監視用途ではなく部分的な監視補助のための性能計算に用いられていた。

2.2.2　第二世代：改良標準化，信頼性，稼働率の向上

この世代では，蓄積してきたプラントの建設経験や運用経験を反映するとともに，当時国内の最新技術の適用，改良標準化，より高い信頼性の設備導入を進めた。

制御棒駆動装置のダブルホールド化，位置指示監視システムの検出器多重化による信頼性向上を図るとともに，補助設備を皮切りとしたデジタル設備導入，計算機によるCRT監視の拡大によって，デジタル化時代の先駆けとした。

次にプラント主要制御系・放射線モニタ等にデジタル装置を開発し導入することによって，運転自動化の拡大を行い，多重化システム技術・分散化・自己診断機能の採用による信頼性と保守性の向上を図るとともに，重要警報の識別を容易にするなど，マン・マシンインタフェースの改善，プラント稼働率向上を図った。

電気設備では，発電機負荷開閉器(GLBS)の採用による，変圧器台数の低減とプラント受電系統強化を図った。

2.2.3　第三世代：更なる信頼性・保守性の向上

第三世代では，マイクロプロセッサ応用技術，高速データ伝送等の技術の適用や，耐環境性(EMC(Electro-Magnetic Compatibility)ほか)を向上させた設備をプラント設備に適用することによって，運転監視･制御･保護システムの総合デジタル化を実現した。

この総合デジタル化システムには，高信頼化ソフトウェア技術(割り込みレス・定周期・ホワイトボックス化)と検証技術(段階的かつ徹底した検証)の適用によって，常用系に加え安全系もデジタル化を図っている。

また，各設備の機種統合・通信システムによる結合・情報の一元管理化，運転員負担軽減とヒューマンエラー防止のためのタスク分析・運転検証を経た全ソフトオペレーションのマン・マシンインタフェース採用によって，デジタル技術が持つ信頼性・情報伝達性・保守性上のメリットを最大限に生かしたシステムを実現した。

これらの最新技術を新設及び更新工事にも適用することで，システムの機能・性能・信頼性の向上に貢献した。

電気設備では，発電機の大容量化，所内UPS(Uninterruptible Power Supply)・開閉設備の省電力化・コンパクト化を図った。

2.2.4　グローバル化と世界最高水準の安全性への取組み

国内で培った技術を基に，現在，安全系プラットフォームの米国NRC(Nuclear Regulatory Commission)認証取得を推進している。この安全系システムは中国CPR(China PWR)プラントに14セット納入している(2014年6月時点)。また，国内最新規制指針に対応した安全対策の実施と，世界最高水準の安全性達成に向け，電源設備の多様化，設備耐震性の強化，セキュリティ強化，シビアアクシデント対応設備等の開発を推進している。

今後，原子力発電分野で，各国規制に適合した製品を供給する電気・計装設備フルラインアップサプライヤーとして，グローバル展開を進めていく。

2.3　タービン発電機

当社のタービン発電機の歴史は，1908年に長崎の三菱造船所に同所中央発電所用として2極625kVAを製造したことから始まっている。その後，ウェスチングハウスエレクトリック社との技術提携によって，技術的に大きな進歩を遂げ，戦後の復興や高度経済成長期など急速に高まった電力需要を支えてきた。ここでは社会・経済の変化とともに発展してきたタービン発電機の技術動向について述べる(**図4**)。

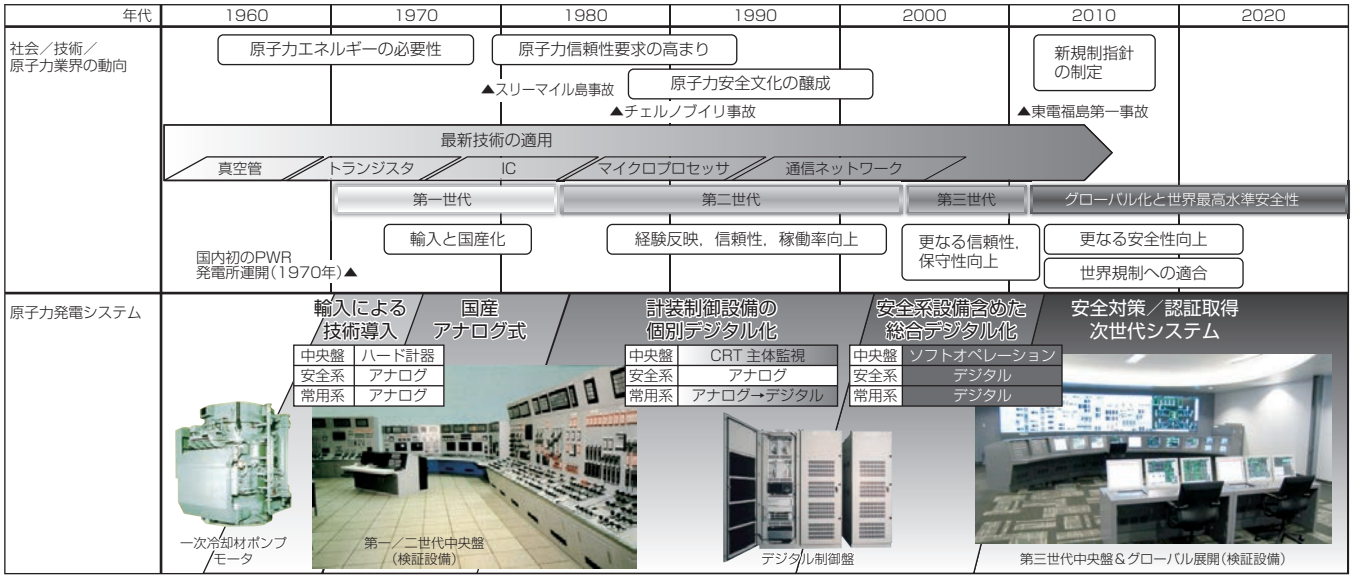


図3．原子力発電システム技術の変遷

2. 3. 1　技術の変遷

(1)　電力需要増加に伴う設備増強(1950 ～ 1960年代)

戦後の電力需要増加に対応して，冷媒に水素を採用した発電機が普及し始めた。水素は空気と比べて冷却性能が高く，特にコイル内部に通風孔を設け直接冷却する方式(内部冷却)の出現以降，発電機の最大容量は更新され続けた。当社でも1959年に内部冷却第１号機208MVAを製作して以来，相次いで記録品の製作を手掛け，1965年頃には400 ～ 500MVA級まで大容量化が進んだ。

(2)　火力／原子力向発電機の大容量化(1970 ～ 1980年代)

オイルショックの影響によって本格的に原子力発電が推進され始め，当社でも原子力発電向け発電機の開発を進めた。当時の開発によって，原子力発電向けタービン発電機は従来の400MVAから３倍以上の1,300MVAを製作するまでに至った。発電機容量を大きく引き上げた要因は，固定子コイルの冷却媒体に水を採用した効果が大きく，流路の腐食や水漏れなどの課題を試作・検証を重ねて解決しつつ高品質の水冷却技術を確立させた。水冷却技術はその後の大容量化技術の基礎となり，火力発電向けタービン発電機にも採用され，飛躍的に単機容量を向上させた。

当時，省エネルギー化の社会的要求が高まり，タービン発電機の高効率化を進めた時期でもある。計算機の性能が向上し，電磁界や通風等より高度な計算処理が可能となったことで，回転子断面の構造最適化や新通風冷却方式などの技術開発が進み，1989年には高効率技術を採用した水冷却機670MVAを製作し，従来機に比べて0.2％の効率改善を達成した。

(3)　発電設備の経済性の向上と高効率化(1990 ～ 2000年代)

バブル経済の崩壊後も海外の電力需要は堅調であり，大容量機の開発が進められた。高強度の軸材や保持環の開発が進められ，回転子の大径化によって大きく出力を向上させた。火力発電向け２極機では1998年に990MVA，原子力発電向け４極機では2002年に1,600MVAを製造した。

一方で，ガスタービンを利用した熱効率の高い複合型発電方式(GTCC)の利用が世界的に拡大し，大容量で高効率な水素間接冷却機の開発が本格化された。当時の水素間接冷却機はシンプルな通風方式で高効率ではあったが，冷却面で内部冷却機に劣っていたため，高性能絶縁や高効率ファンなどの適用によって冷却を強化し大容量化を進めた。また，３次元FEM(Finite Element Method)を用いた電磁界・流体解析を駆使して低損失構造を実現し，加えて低損失軸受などを導入することで，従来の同出力機と比べて0.2％の効率改善を達成した。

(4)　最新技術

発電機の最大容量は更に増加し，水素冷却機では２極1,400MVA級，４極2,000MVA級，空気冷却機では350MVA級の設計を完了している。2013年には大容量の水冷却機に水素間接冷却機のシンプルな通風構造を適用した新型の高効率水冷却機を製作し出荷した。これらは高強度部材の開発に加え，高性能絶縁の適用や通風冷却の改善などによる冷却性能の向上によって実現可能となった。これらの技術に加えて，更に熱伝導率を高めた高性能絶縁の適用によって，900MVA級の高効率水素間接冷却機の開発を2014年度中に完了し製品化する。

2. 3. 2　将 来 動 向

更なる高効率化と大容量化のため，高性能絶縁システムと先進要素技術の開発に取り組む。また，ITを駆使した製造技術，状態監視技術，予防保全の開発を進めるとともに，当社保有の超電導発電機技術の応用も視野に入れ，引き続き社会及び顧客の要求に応える製品を提供していく。

2. 4　水力発電システム

100年以上の歴史を持ち，かつては日本の主電源であった水力発電システムは，クリーンで再生可能なエネルギーとして再び注目を集めている。既に揚水発電所が蓄電設備

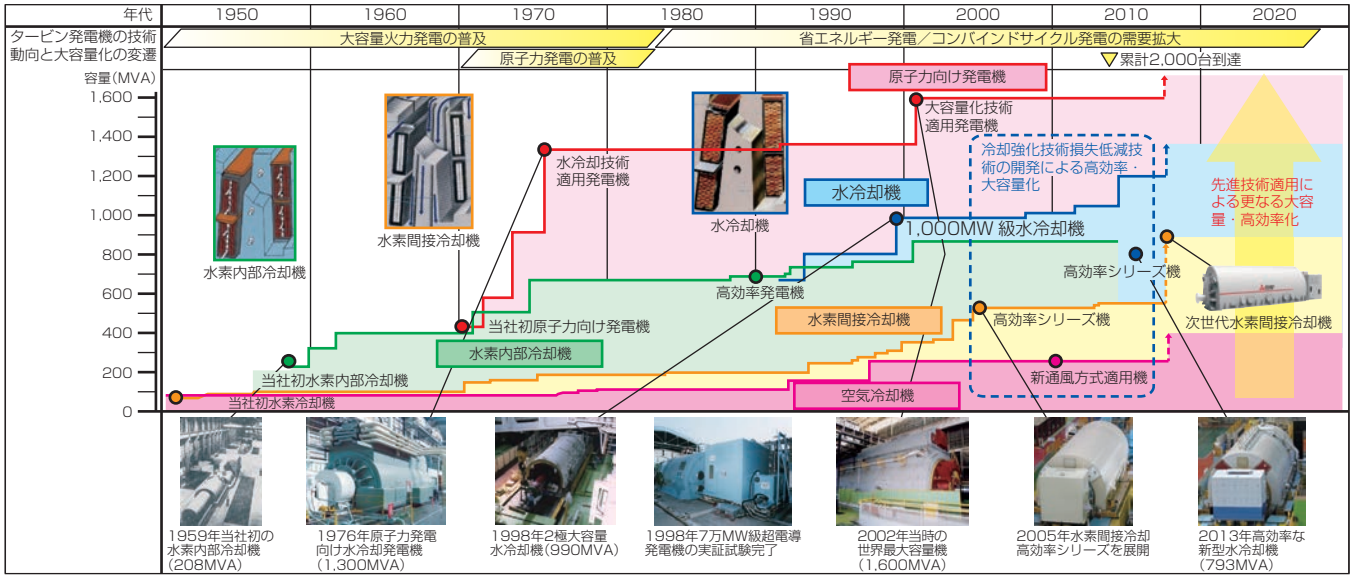


図４．タービン発電機技術の変遷

としての役割も担い，電力需要の負荷の平滑化に貢献してきたことは周知であるが，特に可変速揚水発電システムでは，系統安定化のための高速電力制御機能が大いにその性能を発揮している。このように，幅広いニーズに対応してきた水力発電システムの技術動向について述べる（**図５**）。

2. 4. 1　水力発電設備の技術動向

発電所建設地の制約や建設コストの削減の方針に応えるため，1980年頃から水力発電システムは，一般水力，揚水を問わず高速・大容量化に向けた各要素技術の開発に邁進（まいしん）してきた。その技術革新の例について述べる。

(1)　発電機

発電機の高速・大容量化では，回転体の強度アップは言うまでもないが，軸受の信頼性向上及び冷却方式の開発が最大の課題である。

①　樹脂軸受

軸受は発電機の構成部品の中でも最も信頼性が要求される部位の１つである。軸受摺動（しゅうどう）面に，従来のホワイトメタルと比較して，耐摩耗性，耐焼付性，高温での機械強度に優れ，摺動摩擦係数の低い樹脂PEEK(注2)（ポリエーテル・エーテル・ケトン）を適用する技術開発を行った。1999年に中容量発電機への適用を皮切りに，中小一般水力向けを中心に実績を積み，2003年に揚水発電電動機に，さらに2006年には当社最大寸法の大容量機にも展開した。

②　冷却技術

大容量化に伴い製作限界を決する重要な要素となった固定子・回転子の冷却については，解析によってラジアルファンとリムダクトの併用を最適化した自冷通風方式を開発し，2000年に従来の容量・回転速度の実績を大きく上回る揚水発電電動機に適用した。

(2)　監視・制御装置

監視・制御装置はデジタル化され，近年では制御ネットワーク，OPS（OPerator Station）による遠隔操作監視が可能となった。また装置は省スペースと省電力化，高信頼性と高機能化（保守性向上）が進み，環境負荷低減，高度なプラント制御実現に寄与している。

2. 4. 2　可変速揚水発電システムの技術動向

可変速揚水発電は，近年の風力発電や太陽光発電の増加に対し，系統電圧維持及び系統周波数の変動抑制等，電力系統の安定化のために寄与できる発電システムとして注目されている。一方で，一般水力に比べ設備が多くなることによって大容量化による経済性の追求が必須であり，高速化によるコンパクト化が技術課題である。

可変速揚水発電電動機の回転子は一般揚水機の突極回転子と異なり固定子と同様の三相巻線を適用するが，回転速度の２乗に比例して遠心力が働くため，高速になるほどコイルエンド部の強度確保が困難となる。このため，1994年にバインド線による高速機向けコイル支持構造を開発し，回転速度600r/minの世界最速級機を2009年，2011年に国内向けに２台，2010年に海外向けに１台納入した。

2. 4. 3　将 来 動 向

水力発電システムは，今後とも“電源のベストミックス”で重要な一翼を担ってゆくものと考える。

系統安定化を可能とする可変速揚水システムは，更なるコンパクト化を図りシステムの導入を促進する。また既存設備を最新の高効率機に更新することによって，発電所の延命化と水資源の最大活用に向けた取組みを進める。

（注２）　PEEKは，Victrexの登録商標である。

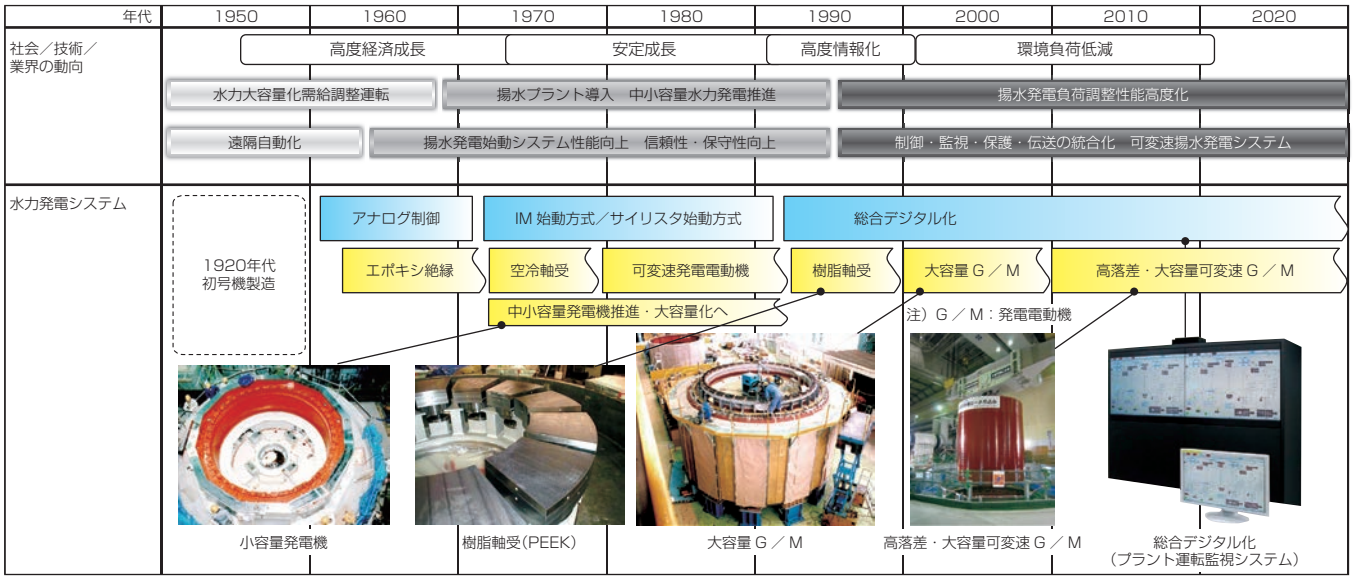


図５．水力発電システム技術の変遷

3. 今後の展望

2011年に発生した東日本大震災以降，電力安定供給への関心の高まり，電力システム改革を起点とする新たなエネルギー需給システム構築への取組みが加速している。再生可能エネルギー利用の拡大に代表されるエネルギー源の多様化とともに分散型エネルギーの有効性の認識が進み，地域の特性に応じたエネルギー需給管理の実現やそれを支える電力系統全体の運用性向上等，電力市場では今までにない多くの変化が強く求められている。

当社は発電プラントの変遷とともに，それを支える高度な技術で発電機，主回路設備等の大容量化やコンパクト化を進め，また最新の監視制御システム適用によるプラント安定運用，省力化に取り組んできた。近年では，大容量化とともに適用が進むガスタービン起動に不可欠なパワーエレクトロニクス応用の静止型起動装置の開発など，高効率で環境負荷の低い最新の発電プラントに合致した電機品を供給し，最適な発電プラントの実現に向けた貢献を重ねている。

4. む す び

今後も当社は，火力，原子力，水力といった電力供給の中核となる発電システムを主体としつつ，電力市場の自由化進展の中で拡大する新たなエネルギー最適運用への要求に対し，監視制御技術，情報通信技術での先端技術を結集させて応えていくとともに，発電プラントに欠かすことのできない発電機など高度な技術に支えられた基盤となる電機品の継続的な開発・製造を通じて，多様化する要求に幅広く応え，社会の永続的な発展に向けた貢献を続けていく。

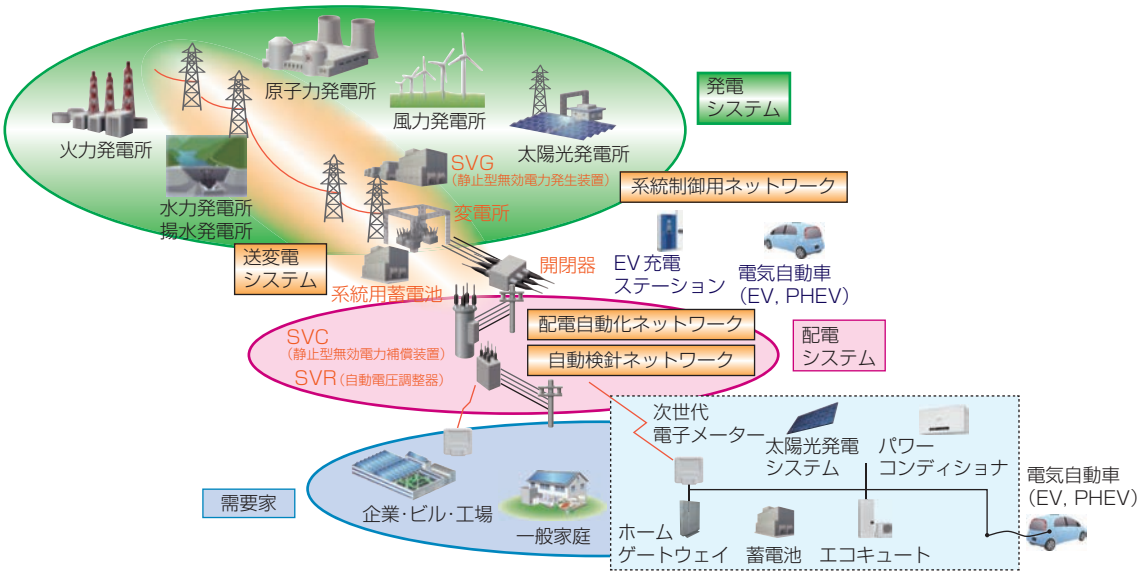


図6. 電力システムの今後(イメージ)