



濱本総一*

インフラの革新を支える技術

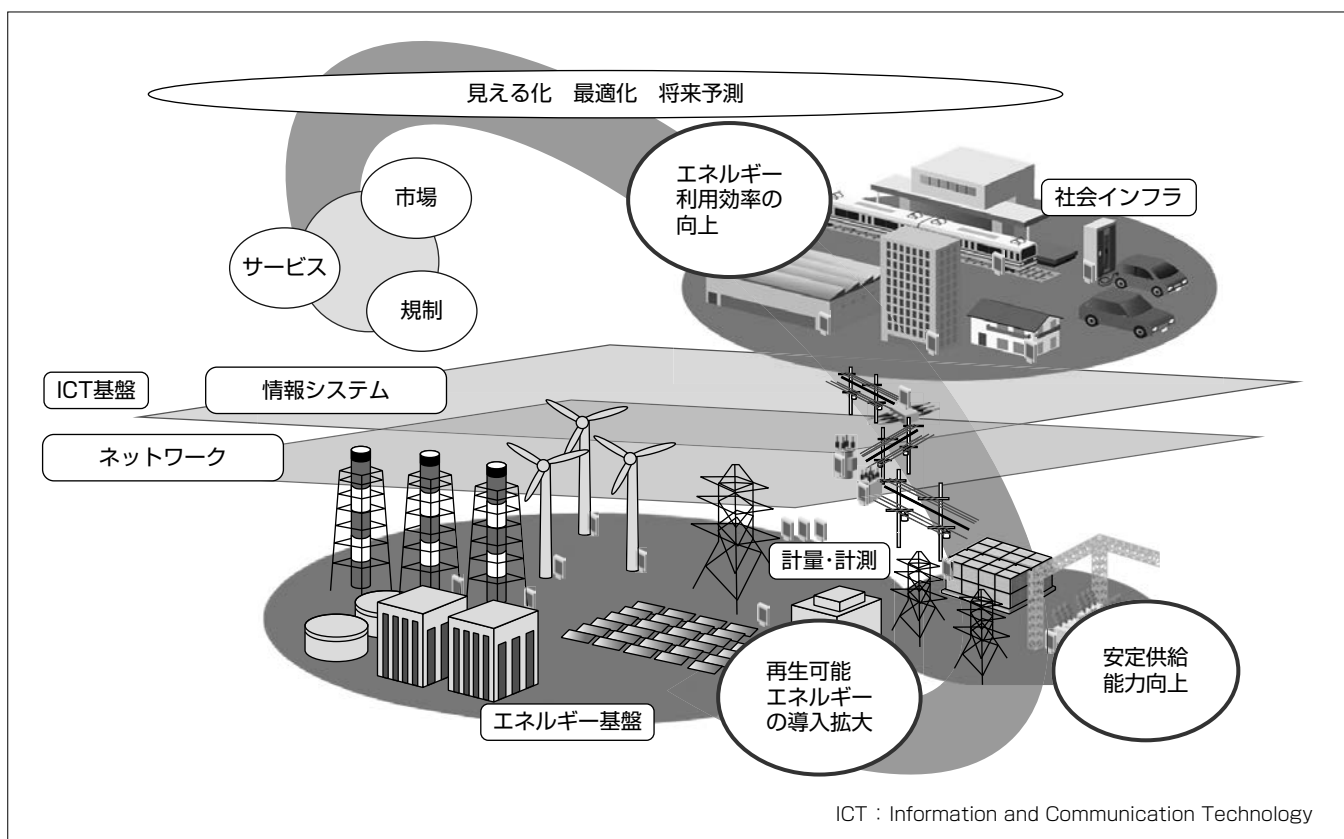
Technologies to Realize Changes of the Infrastructure

Soichi Hamamoto

要旨

現在の経済成長と技術革新は安定した電力の供給によってもたらされている。大規模電源開発と長距離送電、配電網の整備、電力システムの安定運用は社会を支え、多くの技術革新をもたらしてきた。近年、エネルギーへの関心の高まりも相まって、需要だけではなく供給源としての電気も非常に身近なものとなってきているが、そこには大規模集中と小規模分散を柔軟にシステムに統合すること、市場の中で高い自由度で運用するという高難度の技術課題が内在している。再生可能エネルギーを含む分散型の電源が大量に導入された場合でも調和のとれた電力システムの実現では、設備状態の把握、運用変更によるシステム全体の安定性、さらには、過去の蓄積データからの健全性評価など実

態の把握と予測の精度を高くし、効率的に実施することが重要となってくる。このように、機器本体、現場制御、情報システムはより密接な連携、情報の相互接続性を確保しながら高度化することが期待されている。この高度化では、膨大なデータを収集し管理することに加え、気象などの基盤情報活用や機器劣化予測のためのモデル化とシミュレーション方法の確立、システム運用への組み込みなど設備・システム設計に深く根差したものとすることが必須である。エネルギー、医療など重要な社会インフラを支える基盤技術が新たな価値創出で更に重要性を増す中、三菱電機は長年培った実績に基く先進技術を取り入れた技術開発に取り組んでいる。



持続可能な社会を目指して

ICTの進化、標準化や測定機器設置コストの低減とともに多様な計量・計測データがデジタル化され、これまで分断されていた情報システムと現場制御システムの融合が始まる。ICTの活用は、分野ごとの合理化や最適化から今まで想定されなかったデータ活用を発生させ、インフラ全体の最適化に向けた変革が進む。当社はエネルギー、医療など重要な社会インフラを支える技術を基盤に、新たなパラダイムでの技術革新に貢献していく。

1. ま え が き

現在の経済成長と技術革新は安定した電力の供給によってもたらされている。大規模電源開発と長距離送電、配電網の整備、電力システムの安定運用は社会を支え、多くの技術革新をもたらしてきた。例えば、発電設備の大容量化、高効率化、省力化など社会的要請に応じた製品・システムの継続的な開発も重要な社会インフラを支える原動力として、様々な課題を解決しながら強固な電力インフラの礎となっている。近年、エネルギーへの関心の高まりも相まって、需要だけではなく供給源としての電気も非常に身近なものとなってきているが、そこには大規模集中と小規模分散を柔軟にシステムに統合すること、市場の中で高い自由度で運用するという高難度の技術課題が内在している。電力システム改革での新たな競争原理の導入と国際競争力の強化、市場参加者が多様化する中でのエネルギーの安定供給、ICTの進化がもたらす社会全体の変化など、新たなパラダイムにおける数々の技術革新にも当社の培ってきた基盤技術を活用することができる。

本稿では、エネルギー、医療など重要な社会インフラを支える技術が新たな価値創出で更に重要性を増す中、先進技術を取り入れた当社の技術開発への取り組みについて述べる。

2. インフラ技術の貢献

2.1 グローバル目標

“国連持続可能な開発サミット”(2015年9月)で採択された、“持続可能な開発のための2030アジェンダ”の開発目標の1つに“すべての人々の、安価かつ信頼できる持続可能な近代的エネルギーへのアクセスを確保する”と示されている。また、2015年12月にフランス・パリで開催されたCOP(Conference Of the Parties)21(国連気候変動枠組条約第21回締約国会議)で、2020年以降の温暖化対策の国際枠組み“パリ協定”が採択された。これらグローバル目標達成の中核にインフラ技術の革新や既存インフラの価値向上がある。例えば、温暖化対策でも、地球温暖化の状況を可視化して正確に把握することを可能とする技術は、その対策を効果的に進める推進力となる。温室効果ガス観測技術衛星の高性能な観測センサと広域な測定数の飛躍的増加が温室効果ガスの濃度分布測定精度向上に寄与するとともに、情報処理技術による気候変動予測精度の向上が実現されている。正確な数値の把握は、正しい評価と合理的な対策を導く。

2.2 電力システム

2.2.1 電力システムへの期待

米国で電気の工業利用から大容量発電所、長距離送電線の建設が始まり、電気利用の多様化と配電網の普及など電力インフラの構築によって電気の活用が20世紀の生産性向上の原動力となった。電気は輸送が容易で様々な用途に

適した量に変換しやすいという利点を持ち、この有効活用がエネルギー利用の高度化、効率化と一体となって社会を支えている。引き続き、電気は21世紀における持続可能な社会実現に向けた原動力であり、より環境負荷の低いエネルギー活用、発電方式の開発、機器の高効率化、再生可能エネルギーの導入など特に温室効果ガスの削減に向けた技術応用への期待は大きい。既存のインフラ技術に常に先進技術を取り入れていくことはこれらの基盤をなす重要な取り組みである。当社でも大容量化・高効率化・コンパクト化を可能とする新型発電機“VP-Xシリーズ”を開発し、大出力領域でも高効率で保守面に優れたタービン発電機の提供を開始している。さらに、この開発で得た新開発要素技術を既設機にも適用し、既存インフラを含めた高効率利用、環境負荷の低減への貢献を広く進めている。

2.2.2 電力システムインフラの変革の動き

経済産業省の“長期エネルギー需給見通し”で、2030年のエネルギーミックス(総発電電力量に占める各電源構成)は次のとおりである⁽¹⁾。再生可能エネルギー22~24%程度、原子力20~22%程度、LNG(Liquefied Natural Gas)火力27%程度、石炭火力26%程度、石油火力3%程度(再生可能エネルギーのうち、太陽光・風力は8.7%程度)である。電源構成についての基本的な考え方は、“安全性、安定供給、経済効率性及び環境適合に関する政策目標を同時達成する中で、徹底した省エネルギーの推進(対策前比17%削減)、再生可能エネルギーの最大限の導入、火力発電の効率化などを進めつつ、原子力発電依存度を可能な限り低減する”というものである(図1)。

一方、欧州委員会では、“2030 climate and energy framework (2030気候及びエネルギー政策枠組み)”を設定し、エネルギーミックスで更なるエネルギー削減を27%とした上で、再生可能エネルギーの割合を27%とすることを目標に掲げ、原子力発電はベースロード電源としてエネルギー安全保障の中で重要な役割を担う。課題達成のため、域内エネルギー市場の改善に向けて、加盟国間のエネルギーイ

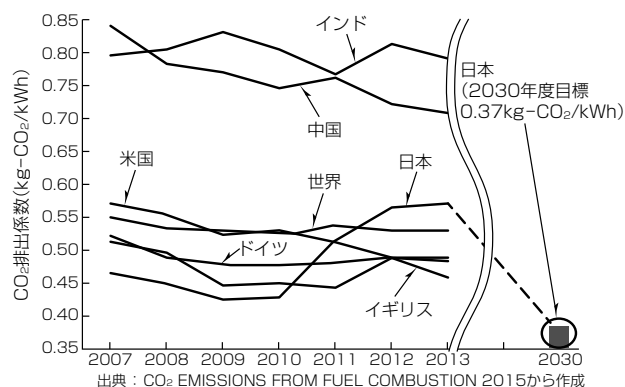


図1. 各国のCO₂排出係数実績と日本の2030年度目標 (資源エネルギー庁)⁽²⁾

インフラの相互接続の割合を増大させることを目指し、域内エネルギー市場を完成させ、インフラネットワークの不足部分を補強するとしている。また、米国では、老朽化した送配電網の整備とエネルギー効率の向上が急務となり、送配電グリッドの近代化が進められている。米国エネルギー省がGrid2030として“A National Vision for Electricity’s Second 100 Years(次の百年に向けた国家電力ビジョン)”や“National Electric Delivery Technologies Roadmap(電力供給技術ロードマップ)”“A Vision for Modern Grid(送電網の近代化ビジョン)”といったロードマップを示し、スマートグリッドをエネルギー安全保障ロードマップの中核として改革を推進している。

非OECD(Organisation for Economic Cooperation and Development)諸国では、経済成長に伴い、石油消費が増加し、世界の石油消費に占める非OECD諸国のシェアは1973年の26%から2013年には50%となり、逆にOECD諸国のシェアは74%から50%にまで低下してきている。一方で、再生可能エネルギーの導入は非OECD諸国でも推進、拡大する方向にあるなど、電力システムの変革における先進的な技術を非OECD諸国のシステムへも積極的に反映させていくことは必須の課題である。電力システムの変革は社会システムの多様性、持続可能性を担保する重要なファクタであり、当社は長年培ったインフラ技術とその技術革新によって電力の安定供給、持続可能な社会の実現に向けたグローバルな貢献を目指している。

3. 運用の高度化技術

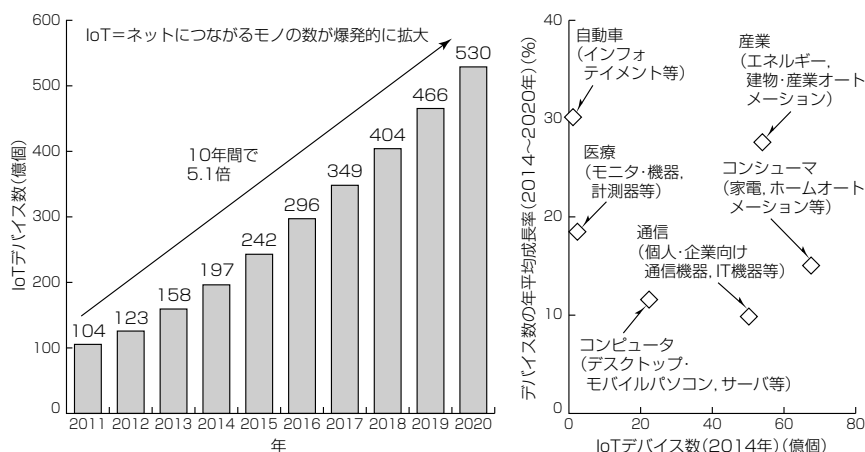
電力システム改革における電力の市場化は、保有設備を確実に運用することに加え、その運用を市場の中で最適にするという新たな課題を生む。設備運用は経済合理性の追求における収益最大化の中で一層重要度を増すものとなる。設備資産そのもの、関連する業務、運用・保守を見える化するための情報の高度融合、情報量増大における標準化への対応は、運用の高度化に向けて第一に適応しなければならない課題である。

発電設備では使用燃料による差異、運用性能による差異に加え、期待性能を安定に、長期にわたり発揮させることが運用益の最大化につながる。長期運用の根幹をなす設備の保全活動は、壊れたら修理する事後保全、運用による摩耗、定期点検による異常部位の交換・修繕などの定期予防保全(運用時間に応じた保全：Time Based Maintenance)、さらには、稼働中の運用データに対し診断技術を高度活用した予知保全(機器、設備の状態に応じた保全：Condition Based Maintenance)に大別される。生産活動への影響度や合理性に基づく判断によって、現場巡視も含めこれら保全活動を組み合わせて設備保全は網羅されている。中でも情報通信技術の浸透によって、発電機の現場保守でも、測

定された膨大なデータを活用した絶縁寿命の評価を行うオンライン部分放電監視システムによる運転中の早期異常検知、簡略点検下での点検項目の充実や本格点検時の事前準備の拡充を目的としたロボット点検の導入などによって、これまでなし得なかった網羅的なデータ収集を可能とし、データマイニングなどの解析を行う情報処理技術の適用可能性が高まってきている。

ICT化の進展がもたらす変化のうち大きな変化に、IoT(Internet of Things)がもたらす変化、ビッグデータの利活用の進展がもたらす変化が挙げられている。しかし、新たな設備、システムは費用対効果の面で円滑に導入が進まない状況が生じやすい。運用設備の重要度に加え、熟練技術者からの技術継承問題への対応、経済活動における必須の価値としての認識が広がること、標準化や測定機器設置コストの低減とともに付加価値の高いサービスを伴いその設備活用と運用の高度化が両輪となって進展することが期待される。主要な社会インフラである電力では、安定運用に対する要求が高く、停止を伴う定期点検などでは代替の電力供給を考慮した上で計画的な運用変更が行われる。さらに、CO₂フリー電源として再生可能エネルギーなどの分散型の電源が大量に導入された場合でも調和のとれた電力システムの実現では、電源の代替方法を考慮するための設備状態の把握、状態変動に対するシステム全体の安定性を向上させる多様な設備の導入・運用を含めて実態の把握と予測を効率的かつ正確なものとするのが重要となる。当社で開発した発電機用交流界磁ブラシレス励磁システムは、パワーエレクトロニクス技術応用による可動機器の削減など発電機の運用の自動化、保守の省力化に適應するものである。ICT化に加えてこのような分散設置に適應する設備の導入が両輪となって全体システムを統合した運用の高度化を実現し、付加価値の高いサービスへの投資を生む新たな循環が期待できる。

ICT化の進展で保全と運用はより密接な連携、情報の相互接続性を確保しながら高度化することが期待されている。膨大なデータを収集し管理すること、機器劣化予測のためのモデル化とシミュレーション方法を確立すること、システム運用への組み込みなど機器・設備・システム設計に深く根差したものとすることが必須である。これらは情報通信技術の応用と運用技術、インフラ技術の融合によって初めて実現できるものであり、現場運用、機器設計の知見を前提として、フィールドデータの統合的管理から関連する情報を抽出し運用へのフィードバック、設備管理の視点から収集データを選定し管理を精緻化するなどの高度化を図っていくこととなる。同様に、当社はサービス事業拡大でユーザーの現場運用と当社が持つ機器設計の知見を融合させるシステム基盤を提供しながら基幹製品の価値の最大化を目指している。ICTサービスは大きくその全体像を変化させており、現在は、ICTインフラ整備中心からICTイ

図2. IoTの推移・予測(総務省)⁽³⁾

ンフラ整備に加えてICTの本格的な利活用の時代へ移る過渡期と位置付けられている。また、あらゆるモノがネットワークにつながり、そこから生成されるビッグデータを利活用することで様々な価値が創造されるIoT時代の到来といわれる(図2)。高効率、高性能な機器・設備、監視制御の導入に加え、それらインフラを運用するための高度なインフラマネジメントを実現する要素を一体で織り込むことがライフサイクルコスト低減など更なるインフラの質の向上を実現する。

4. サイバーフィジカルシステム

多様なデータがデジタル化され、分断されていた情報システムと現場制御システムが融合したサイバーフィジカルシステムによって、今までは想定されていなかったデータの活用が発生する。IoTの進展によって機器の動作、状態がセンサで自動的にデジタルデータ化され、リアルタイム化も進みつつある。新たな価値創造を可能とする先進のICTは、多様なモノや環境の状況をセンサなどのIoTデバイスやレーダなどのセンシング技術で把握し、それらからの膨大な情報を広域に収集し、ビッグデータ解析を行った上で将来を予測し、多様な社会システムのリアルタイムな自動制御を行うとされている。

一方で、実際の運用現場では、例えば運転とメンテナンスは相互に関連はするものの、基本的には互いの制約条件は切り離して各々独立して計画を立案しており、両者の相関関係を考慮した計画立案は実施されていない。この方法は、互いの制約条件の優先順位が決定される場合に一定の解を得るための現実的な方法として採用されているものである。複雑化、多様化するシステムではこれら制約条件も互いに関連し合い、分離した問題として取り扱うことが困難となるが、収集されたデジタルデータを高度情報処理技術によって有用な情報に変え、これまでは困難であった又は想定していなかった情報を相互連携させて情報から新たな価値(知見)を生み出す作業を高速に繰り返すことを可能としていく。統計的アプローチ又は物理的アプローチを用いて現象をモデル化してシミュレーションする技術が中核となり、現場に

おける知識が集約され、情報システムでの最適化処理、現場での自動制御の拡大、さらには、将来予測にまで拡張した全体最適を実現する一連のシステムが浸透していくものと考えられる。

情報社会では、分野ごとの合理化や最適化が主たる目的であったが、ICTの更なる進化は、これまでは実現できなかったデータの収集、蓄積、解析、解析結果の実世界へのフィードバックといった一連のサイクルを社会規模で可能にしていく。

例えば、電力の市場化の進展、太陽光・風力などの制御困難な再生可能エネルギーの大量導入に対応した複雑化する送配電ネットワークでも、ネットワーク上のあらゆる地点の状態、環境情報を収集し、ネットワークの電圧・周波数の安定制御、電力取引業務などとの連携、いわゆるスマートグリッドの実現で、相互の情報連携、情報の相互接続性は高度な技術課題を解決するための必須要件である。

情報処理技術の分野では最適化や予測アルゴリズムなどの高度化に加え、人工知能(Artificial Intelligence: AI)への取組みも加速している。また、情報の相互接続によって、これまで系統的に隔離されていた重要インフラ向け制御システムでもサイバー攻撃は無縁ではなくなり、重要インフラを持っている事業者にも自主的かつ積極的なサイバーセキュリティの確保が要求され、サイバーセキュリティ対策は重要インフラの安定運用の基盤となってきている。セキュリティ監視対応が進んでいる情報通信分野の監視対象はシステム内のデータ(個人情報、資産情報など)であるが、制御システムのセキュリティ監視対象はプラント設備、及び制御装置であり、通信データなどの状態監視以外に、プラントパラメータ、設備動作情報などのプラント運転情報も取り込んだセキュリティ監視の実現など、技術開発領域とその応用は新たな広がりを見せ始めている。

IoTの進展とともに、情報システムと運用制御システムの融合を実現した製品の高度利用システムは、エネルギーだけではなく、交通、医療などの各分野で、相互関係を考慮した統合的な計画の立案と適正な運用を実現し、安全性、安定性、経済性を並立させるシステムとして導入が期待されている。

5. 最適化技術

近年、取得できる情報の網羅性、多様性の高まりの中で、製品への要求も複雑化・多様化しており、業務の合理化・効率化に向けた最適化アルゴリズムが必要とされるなど数理計画の分野が拡大している。一方で、その適用に当たっては、たとえ最適解が計算できたとしても、業務効率向上の目的を満足させるためには高速で安定な処理が求められる。当社は工場自家発電プラント運転計画の最適化問題や

電力システムの経済負荷配分問題に対し高速に計算できるアルゴリズムの研究に取り組み、高速化、安定性を実現したアルゴリズムの実適用を進めている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。

工場自家発電プラントのコスト最小化やエネルギー消費最小化となる運転計画を立案するFEMS(Factory Energy Management System)で、工場のエネルギー需要などの予測値が確定的であるという前提で最適化を行うことは比較的容易であるが、実際には予測どおりではなく工場の操業の突発的変動によって自家発電プラントが供給する電力や熱のバランスが計画どおりではなくなるケースが発生する。この突発的変動の要因となる不確実な事象は、電力会社との電力契約を逸脱する、又は、製品の品質に影響を与えるおそれがあるなどの理由で単純に確率分布における裾野として切り捨てることはできない。実際の工場自家発電プラントの運用では、このような確率分布の裾野に現れる突発事象に備えて余裕を持った運転が行われているものと考え、エネルギーコストの観点からは最も経済的な運用とはならない。さらに、電力の市場化によって自家発電と電力市場との関係は複雑化する方向にあって事業機会も多様化していくため、再生可能エネルギーの導入も含め環境負荷低減と経済性の両立を追求し、確率分布の裾野にある不確実性を考慮しながら運転最適化を実現するニーズは、今後、更なる高まりが予想される。また、電力システムでの経済負荷配分問題では、各種の制約を満たし、種々の性能を持つ火力発電機の総合燃料コストが最小となるように、各火力機が請け負うべき需要量を配分する。これは電気事業者の需給管理システムの中核をなす処理であり、結果として得られる発電量は事業者の収益を左右する。この問題は、多時刻にわたる出力を一括して決定する必要がある、大規模かつ複雑な連続系最適化問題となるが、当社の持つ高速・安定な求解アルゴリズムは最適化技術の基盤技術の1つとして活用されている。例えば、燃料コストが最小となるように、単位時間当たりの発電量を決定する。このとき制約条件として、発電機の出力上下限や各時刻の需給バランスを考慮、計画期間の燃料消費制約を加味した場合、一般二次計画問題として定式化することができる。大規模な非線形最適化問題を高速・安定に解くことが重要となる(図3)。

システムの大規模化、データ量の飛躍的増加に伴い、高速・安定な処理は業務の効率化により一層直結するようになる。さらに、当社ではこれらの技術を応用した電力と燃料の相互運用を最適化する電力・燃料・蒸気需給管理システムの開発を進め、市場取引と設備運用計画を整合させ、契約管理や既存システムとのデータ連携も備えた統合型の最適化システムを実現し、将来予測を行うアプリケーションとの統合など、継続的に技術応用の拡大を図っている。

また、先進医療分野における粒子線治療装置でもアダプ

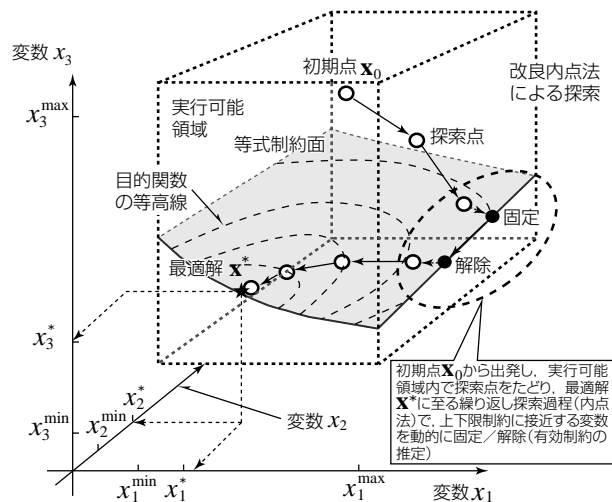


図3. 一般二次計画問題の探索イメージ⁽⁵⁾

ティブ治療として、最適化手法を活用した研究開発が盛んに行われている。患部画像を用いた粒子線照射時の位置決め精度向上技術から、患部状態を把握しながら照射量を決定して最適な治療計画を導くなど、重要インフラの各分野でICTを活用した自動化と高度解析技術による高速で安定な最適化技術の進展が期待されている。

6. む す び

当社は、火力、原子力、水力といった電力供給の中核を担う発電システム、電力システム改革における柔軟な運用を実現する新たな電力流通システム、先進医療システムなど、社会インフラの技術革新に取り組み、さらに、複雑化、多様化するシステムを最適に高度に活用する時代に向けて、情報通信技術、監視制御技術、情報処理技術における先進技術を結集し、その高度運用と安定運用を実現していく。また、インフラの基盤となる発電機、パワーエレクトロニクス応用機器、加速器などの重電機器開発・製造を通じて安全性、安定性、経済性を並立させ、多様化する要求に幅広く応え、持続可能な社会の実現に向けたインフラの変革に貢献していく。

参 考 文 献

- (1) 経済産業省：長期エネルギー需給見通し(2015)
- (2) 資源エネルギー庁：平成27年度エネルギーに関する年次報告(エネルギー白書2016)(2016)
- (3) 総務省：平成27年 情報通信に関する現状報告(平成27年版情報通信白書)(2015)
- (4) 橋本博幸, ほか：高速・安定な二次計画法の開発と実用問題への適用, 三菱電機技報, **83**, No.5, 305~309(2009)
- (5) 北村聖一, ほか：不確実性を考慮した工場自家発電プラントの運転最適化, 電気学会論文誌C, **133**, No.4, 822~830(2013)