

リスクマネジメントに基づく電力施設の 防災保全対策

朱牟田善治¹

¹正会員 工博 (財)電力中央研究所 地盤耐震部 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)

E-mail:shumuta@criepi.denken.or.jp

本論は、リスクマネジメントをキーワードとした既設電力流通設備の防災保全対策の取り組みについて紹介することを目的とする。大型土木構造物と比較して電力流通設備は、設備数が膨大でライフサイクルが短い。災害リスクを考慮してこれらの既設設備を中長期的にどう維持管理してゆくかという問題に対処するため、近年注目されている信頼性重視保全(RCM)とライフサイクルコスト(LCC)の応用可能性について考察する。また、当所で取り組んでいるリスクマネジメントに基づく電力設備の更新戦略についての検討例を紹介する。本論で紹介する方法論は、コストダウンが至上命題となっている電気事業において、効果的な意思決定支援ツールとして期待されている。

Key Words : risk management, lifecycle cost, reliability-centered maintenance, electric power system, renewal planning

1. はじめに

電気事業においては、近年の社会情勢からコスト低減に向けた取り組みが急務な課題となっている。特に、修繕費を含む設備関係費の大幅な削減に向けた取り組みが、電力各社で急速に進められている。図-1¹⁾は、最近の東京電力における設備投資額の推移を示す。平成5年度以降、減少傾向にある設備投資額は、平成13年度に約9722億円に抑制され、向こう3年間の平均設備投資額をさらに600億円程度引き下げる目標設定(7500億円)が中期経営計画に盛り込まれている。このような状況下では防災保全対策も例外ではなく、経済性を重視したコストダウンの検討が実務ニーズとしてもっとも高いものとなっている。

このような背景から本論では、コストダウンを支援する方法論として、近年特に注目されている“リスクマネジメント”をキーワードとした防災保全対策の取り組みについて紹介することを目的とする。

まず、合理的な維持管理を実現するため、欧米を中心に適用例が増えている信頼性重視保全(RCM)の概要を解説し、その現状と課題について述べる。次に、経済性評価手法としてもっとも注目されているライフサイクルコスト評価(LCC)研究のねらいと課題を述べる。最後に、コストダウン研究として当所で取り組んでいるリスクマネジメントに基づく変電設備の最適更新戦略に関する最新の検討事例を紹介する。まとめとして、今後の防災保全のリスクマネジメント研究の方向性について私見を述べる。

2. 信頼性重視保全(RCM)によるコストダウン

(1) 信頼性重視保全(RCM)の概要

信頼性重視保全(RCM)²⁾は1960年代に航空機保全を目的として開発された設備管理手法の総称である。RCMは、工学システムにとって重大な故障に対処するために、適用可能かつ効果的な保全方式を体系的に選り出す解析作業を意味する。RCM解析は膨大な作業量を伴うが、信頼性解析部分と保全作業決定部分に大別できる。信頼性解析部分では、FMEA(故障モード影響解析)に基づき、重大な故障モードとその原因を整理する。保全作業決定部分は、LTA(論理木解析)により、適用可能かつ有効な保守タスクを故障モードごとに選別する。これまでに、欧米を中心に原子力産業や電力会社に適用例が多く報告され、米国電気電子学会(IEEE)でも、電力施設の維持管理の現状調査を実施し、その有用性を指摘している³⁾。

(2) RCM解析ステップ

代表的なRCMの解析手順⁴⁾は以下のとおりである。
【作業1】解析対象システムの決定と情報の収集
はじめに解析の対象となるシステムを決定する。次に解析に必要な情報を収集し、データベース化する。以下に収集すべき情報例を示す。

- ① システム情報：配管計装線図、インターブロック線図、系統取り扱い説明書、機器取り扱い説明書

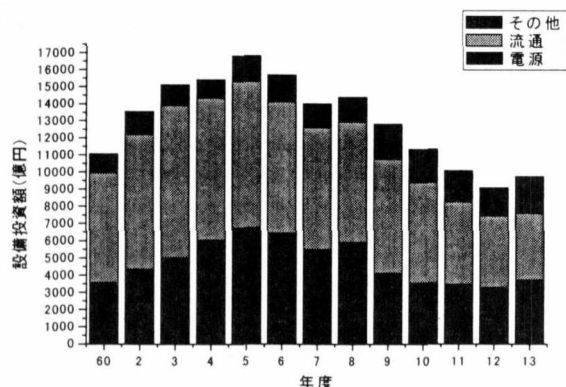


図-1 東京電力の設備投資額の推移¹⁾

- ② 全来歴情報：定期検査報告書，運転データ等
- ③ 機器故障率データ
- ④ 要求仕様情報：保安規定，運転操作基準，技術仕様書

【作業2】システムの分割

システムを解析できる大きさのサブシステムまで分割する。

【作業3】機能故障解析 (FFA: Functional Failure Analysis)

サブシステムごとにシステムに対する機能とその機能故障を抽出する。

【作業4】故障モード影響解析 (FMEA: Failure Mode and Effect Analysis)

作業3で抽出した機能故障を発生させる機器の故障モードを抽出し，その故障モードが当該機器，系統およびプラントに与える影響を評価する。

【作業5】重大・非重大故障モードの評価

FMEA結果をもとに，各機器の故障モードが重大か，非重大かを判定する。

【作業6】保全方式決定ロジックツリー解析 (LTA: Logic Tree Analysis)

対象機器をロジックツリーにかけることによって保全方式を決定する。

【作業7】最新保全作業計画

RCM推奨の保全作業と従来の保全作業を比較し，現行保全作業の継続，追加，変更または削除のアクションを明確にする。また，削減目標を達成するための保守タスクの簡素化案を策定する。

(3) 効果的なRCMの活用方法

RCMの適用が効果的(コストダウンを図れる)かどうかは，保守タスクを既往の方法に比べて，どの程度簡素化できるかにかかっている。ここでいう保守タスクの簡素化とは，主に，以下のような判断を意味する：

- ① 従来よりも点検周期を長くとる(点検間隔の延伸)。
- ② 補修や交換の判断基準を緩和する(補修・交換の判断基準の緩和)。
- ③ 従来まで時間計画保全として対応していた保守タスクを事後保全や状態監視保全に切り替

える(保守政策の変更)。

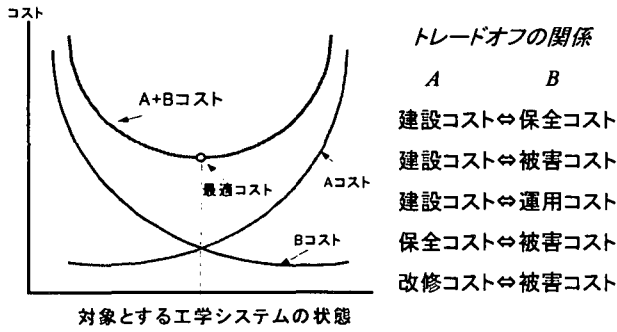
- ④ 従来まで定期点検しかなかったものを重点個所や点検項目などを見直し，細密，普通，簡易点検など保守タスクの細分化を図り，簡素化できる項目を多く見積もる(保守タスクの細分化)。

RCMの成功例として，米国原子力発電所にRCMを適用した結果，RCMの適用前後で，事後保全作業量の10%，予防保全作業量の15%，改良工事の27%の人員数を低減することに成功した例が報告されている⁵⁾。また，筆者は平成12年8月にカナダのBC Hydro International (BC Hydro)に聞き取り調査を行った。BC Hydroでは，パイロットプロジェクトとして同社の水力発電所にRCMを導入し，保守点検時に発生する平均停電時間の約30%の削減に成功している⁶⁾。

ただし，保守タスクの合理化が困難である工学システムの場合には，RCMは不向きである。既往の保守タスクが事後保全で十分であったり，判断基準を緩和できない状態監視保全を採用していたりする場合には，RCMを適用してもあまり保守費用の削減効果は期待できない。また，RCMはFMEAやLTAなどの代表的なシステム解析手法をベースに適切な保全方式の選択を支援するところに手法のねらいがあり，劣化進展モデルに代表されるようなリスク評価の方法論を提供するものではない。このため，維持管理の合理化に必要な点検周期の最適化など，RCMの枠組みでは決定できない問題がある。さらに，RCMは保守タスク簡素化の判断を支援する枠組みを提供するものの，その判断基準は個別の問題に応じて適宜設定することになっている。保守タスク簡素化の判断根拠は，故障，劣化および故障時の影響に関するデータが必要十分に入手できる場合にのみ客観的に与えることができる。しかし，RCMを適用する段階でデータベースが揃うことはまれである。実際に，RCMで必要となる保守タスクの判断基準は，既往の技術指針や現場の技術者の経験的判断により選定されることが多い。

RCMを活用して効果的なコストダウンを実現するためには，削減目標を設定し，できるだけ保守タスクの簡素化を意図したパイロットスタディを行なうことが重要となる。具体的には，まず，現行保守タスクの簡素化が可能な設備候補をRCMにより決定する。次に，削減目標(たとえば，現行の5%削減など)を勘案し，簡素化する保守タスクを一定期間，限定した設備に続ける。これにより，設定した保守タスク簡素化に合理性を与える客観的データをモニタリングし，信頼性の検証を行う。信頼性が確認できたのち，削減目標に達するまでその適用設備の範囲を拡張していく。

LCC評価による最適案の選定とは？
(2者択一を一般化すると？)



対象とする工学システムの状態

図-2 LCC法における代替案の選択の一般化

	被害損失価値を無視	被害損失価値を考慮
時間価値を無視	$\sum_{i=1}^N C_i$	$\sum_{i=1}^N C_i + \sum_{j=1}^K P_j \cdot D_j$
時間価値を考慮	$\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \frac{1}{(1+r_t)^t} \cdot C_{it}$	$\sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+r_t)^t} \left\{ \sum_{i=1}^N C_{it} + \sum_{j=1}^K P_{jt} \cdot D_{jt} \right\}$

i : 費用項目, t : 時間単位, j : 被害形態, N : 総費用項目数, T : 総期間,
 K : 総被害喪失項目数, r_t : 割引率,
 C_i : 項目 i に対する費用, C_{it} : 年時の項目 i に対する費用,
 D_j : 被害項目 j の被害損失額, D_{jt} : 年時の被害項目 j の被害損失額,
 P_j : 被害項目 j の発生確率, P_{jt} : 年時の被害項目 j の発生確率

3. ライフサイクルコスト (LCC) 評価によるコストダウン

(1) ライフサイクルコスト評価の考え方

建築物を対象とするライフサイクルコスト (LCC) は、一般に企画設計費、建設費、運用管理費および解体再利用費にわたる建築物のライフサイクルにわたって必要なすべてのコストを意味する。LCC を計算して各代替案を比較し、その経済性を評価する方法論を LCC 法と呼ぶ⁷⁾。LCC 法の先進国である米国では、基本設計段階における部位仕様・設備システムを選択や企画段階における事業計画の判断目的に活用されている。

本来 LCC とは、上記に示したようにライフサイクルにわたって必要なすべてのコストを意味するが、全費用をすべて洗い出して総費用を算出することは困難である。そこで、代替案として比較したい費用項目だけに着目し、その費用を比較することを広義の意味で LCC 法と呼ぶことが多い。

LCC 法の目的は、主に複数の代替案の中からもっとも経済的な案を選択することにある。図-2は、この概念を一般化したものである。最適代替案の選択とは、対象とする工学システムのライフサイクルにわたって発生する費用項目間のトレードオフを見出し、コストが最小となる状態 (代替案) を選択することである。たとえば、古い設備を更新するための設備投資を多くすれば、地震時の被害コストは小さくなり、両者にトレードオフの関係が成立する。費用項目間のトレードオフが問題となるかどうか、LCC 法の検討を行なうかどうかの判断基準となると筆者は考えている。

表-1は、LCCの基本式を、その評価に不確実な要因を含む「時間価値」と「被害損失価値」という評価軸から4つに分類して示している。最近のLCCに関する研究は、「時間価値」と「被害損失価値」の考慮の仕方でも4つに分類できるものと、筆者は考えている。ここでいう「時間価値」は、割引率によって評価することが一般的である。割引率は、「任意の時点の価値を異なる時点の価値に変換する定率-1

数」と定義され、一般に資本利子率 (金利)、上昇率、リスクプレミアムなどを勘案し、資本資産価格物価モデルなどで調整して定められる⁸⁾。ここでいうリスクプレミアムとは、期待効用理論で定義される意思決定者の効用関数と不確実性の程度で決まるリスクに対する割り増し分のことを意味するが、詳しくは文献⁸⁾を参照されたい。「時間価値」の評価は、ファイナンス工学⁸⁾⁹⁾でも重要なテーマとなっており、割引率で考慮する以外に最近ではリアルオプション¹⁰⁾の考え方が注目されている。リアルオプションとは、不確実性の高い事業環境下で経営のもつ選択権 (オプション) のことを意味する⁸⁾。将来が確定的にわからない不確実な状況下では、意思決定を先延ばしする価値 (オプション価値) を評価して投資戦略を決めることが有効である場合が多い。LCC法でリアルオプションを考慮するには、実在コスト (キャッシュフロー) に、リアルオプションとして評価されたオプション価値を加えて、ライフサイクルコストとみなすことになる。

一方、「被害損失価値」とは、問題となる災害リスクによって生じる被害損失額に、その発生確率を乗じて一般には評価される。ライフサイクルコストに被害損失価値を考慮した例は、地震工学や構造信頼性工学の分野で多く取り上げられており、経済性を考慮した最適設計、設計基準/補修代替基準の設定、および点検政策最適化などへの適用を主な目的としている。最近の代表的な研究例としてたとえば、文献^{11)~13)}を挙げる。地震リスクを含む災害リスクに対する性能妥当性を、力学的な側面だけで検討するには限界がある。LCC法の枠組みで防災保全対策を議論する本質的な意義は、従来までの力学的な検討に経済性という評価を加えて性能評価の妥当性を検証できるところにある。

このように LCC 法の研究では、「時間価値」と「被害損失価値」をどう評価するのか、トレードオフの関係をどう最適化するのか、不確実な要因を含む評価の妥当性をどう議論するのかなどが、重要な視点となる。

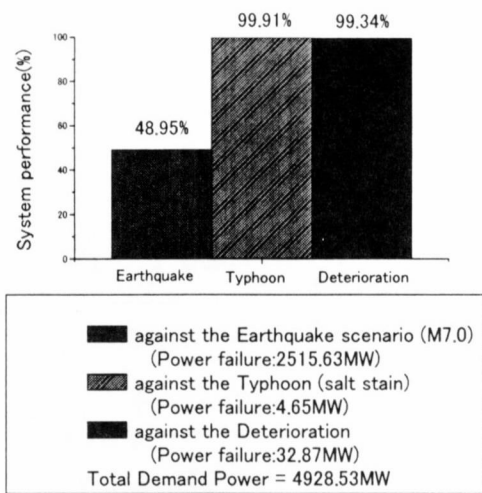


図-3 地震リスク、塩害リスク、経年劣化リスクに対する対象電力システムのシステムパフォーマンスの比較

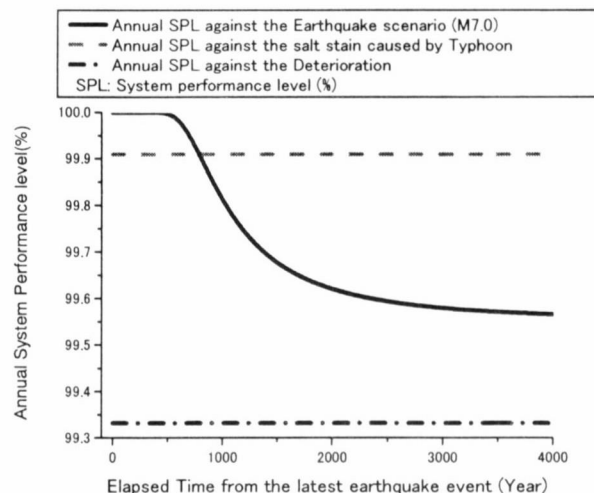


図-4 地震リスク（最新の地震からの経過年数）に対するシステムパフォーマンス（対象とする期間の総供給電力に対する期待供給支障電力の比（%））の感度分析

4. 変電設備の合理的更新戦略の検討

(1) 検討の視点

変電設備を含む電力流通設備に対する設備投資を合理化するために必要な課題の一つは、低頻度しか発生しない大災害に対して現実的にどこまで投資すべきなのか、どの程度の水準が妥当なのかを検討することにある。筆者らは、上記検討にライフサイクルコスト（LCC）評価を含むリスクマネジメントのフレームワーク（RMF）を提案し、合理的な設備更新計画の検討を行なっている。

(2) リスクマネジメントフレームワーク（RMF）

筆者らが提案するリスクマネジメントのフレームワーク¹⁴⁾は4つのステップから構成される。

【ステップ1】マルチリスク（複数のリスク要因）の抽出

地域の特性を踏まえて問題となるマルチリスクを抽出する。マルチリスクとは、対象となる工学システムにライフサイクルにわたって被害を生じさせる可能性のある災害事象とここでは定義する。

【ステップ2】選択されたマルチリスクに対するシステムパフォーマンスの評価

システムパフォーマンスとは、対象とする期間の総供給電力に対する期待供給支障電力の比（%）で評価する。

【ステップ3】マルチリスクに対する合理的なシステムパフォーマンスの検討

マルチリスクに対するシステムパフォーマンスレベルが妥当な性能水準かどうかを考察する。妥当な性能水準は設備所有者や使用者などの意向に基づく政策判断が必要となるが、その政策判断を支援する考え方は、たとえば、文献 15) などでも議論されている。その考え方は、原則的に以下の2つに大別できる。

- ① コンセンサスが得られている他のリスクと同等に合わせる。
- ② 期待される総費用を最小化する。

ステップ3は、上記2つの視点から定量的な考察ができるようなデータを提供する。

【ステップ4】費用対効果分析

許容されるパフォーマンスを満たさない電力システムに対して、上記で示した LCC 評価を応用した費用対効果分析を行う。費用対効果分析により、トータルコストが最小となる設備投資額、更新機器の優先順位および中長期的な更新計画を提供する。

(3) 適用例

本手法を実在する電力2次系統に適用した。ケーススタディでは、対象系統内の2305台の遮断器を更新対象とする更新戦略について検討した例を示す。対象とする電力システムのマルチリスクとして地震リスク、塩害リスク、経年劣化リスクを選定した。塩害リスクと経年劣化リスクは、当該地域において、実際に変電設備の更新計画で考慮されているマルチリスクである。

なお、ケーススタディでは、地震リスクとしてマグニチュード7.0のシナリオ地震を想定し、その発生確率を推定するために、地震の発生は、BPT分布¹⁶⁾を仮定した。塩害は、主に台風により海から運ばれた塩分の変電機器への付着によって被害を受けることを意味するため、塩害リスクは台風と定義する。台風の発生確率は、ポアソン分布に従うと仮定して算定した。経年劣化リスクは、経年的に発生する設備劣化の原因と定義され、熱、電気、機械的応力、周辺環境を意味する。よって、その発生確率は、1.0と仮定した。詳細については、文献 17) を参照してもらいたい。

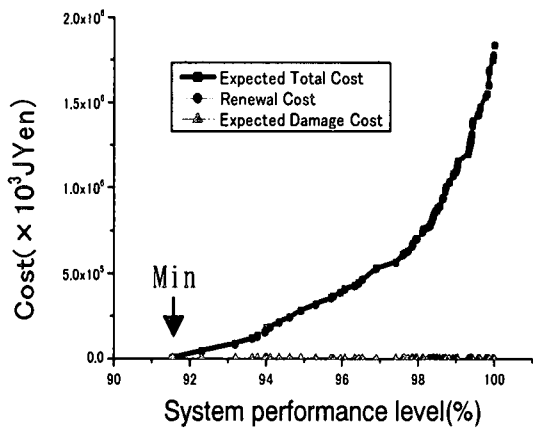


図-5 地震リスクに対する更新コスト(renewal cost)と被害コスト(Expected Damage Cost)のトレードオフ(停電コストを考慮しない場合)

以下には、地震リスクに対する変電設備の更新戦略の検討事例を紹介する。

図-3 は、地震リスク、塩害リスク、経年劣化リスクに対する対象電力システムのシステムパフォーマンスを示す。比較したリスクの中では、地震リスクにより、システムパフォーマンスがもっとも低下することがわかる。このことは、地震が一旦発生した場合、比較したマルチリスクの中でもっとも大きな被害を生じさせることを示唆している。

図-4 は、地震リスクに対するシステムパフォーマンスの感度を示す。地震リスクの変化として、横軸に当該地域に発生した最新地震からの経過年数を取り、経過年数ごとのシステムパフォーマンスをプロットしている。比較のために、塩害リスク、経年劣化リスクに対するシステムパフォーマンスを重ねてプロットしている。図中、約780年以前の経過年数では、地震リスクに対するシステムパフォーマンスがもっとも高くなるものの、最新の地震からの経過年数が780年を超えるとそのパフォーマンスは、塩害リスクよりも低くなる。通常、設備更新の優先順位を決定する場合、塩害リスクや経年劣化リスクは考慮されるものの、低頻度にしか発生しない地震リスクは考慮されない。しかし、塩害リスクに対するシステムパフォーマンスを目標性能水準とすると、当該地域においては更新優先順位を決定する場合においても、低頻度な地震リスクを考慮した方が合理的であるとの判断となる。

図-5 と図-6 は、地震リスクに対する更新コストと被害コストのトレードオフの関係を表-1のライフサイクルコストの基本式に則り計算した結果を示す。図-5 と図-6 の相違は、被害コストとして需要家が被る停電コストを考慮するかしないかにある。停電コストに関する検討は、日本ではあまり例がないが、本論では、文献18)のデータを参考にして設定した。文献18)では、停電が発生した場合の被害額を仮想評価法(CVM)によりモニタリングし、停電コストを

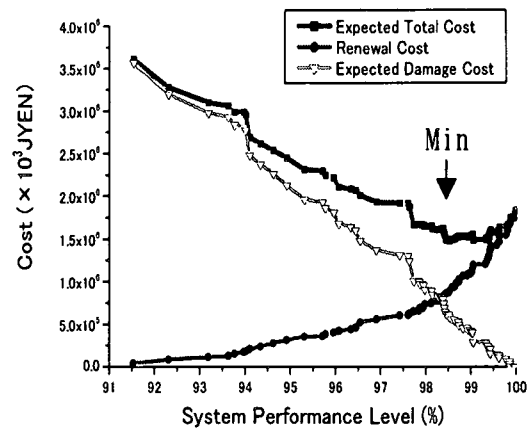


図-6 地震リスクに対する更新コスト(renewal cost)と被害コスト(Expected Damage Cost)のトレードオフ(停電コストを考慮した場合)

推定している。図-5 は、被害コストとして停電コストを考慮しない場合の結果を示す。このケースは、設備更新をしない場合がもっともトータルコストが小さくなることを示している。すなわち、供給側の費用対効果を考えれば、設備更新を行わないことがもっとも合理的な地震対策となる。一方、図-6 は、停電コストを考慮した結果である。この場合、更新コストと被害コストの間には明確なトレードオフの関係があり、約9億円を更新コストとして投資すれば、トータルコストが最小となる。これらの結果は、停電による需要家への影響に対する考慮の有無が、設備更新戦略に大きく影響することを示唆している。このため、当所では、需要家停電影響評価モデルの高度化に着手しており、より実用的な電力流通設備の長期的整備戦略支援ツールの開発を進めている。

5. まとめ

本論では、コストダウンを実現する方法論として近年注目されているリスクマネジメントをキーワードとした防災保全戦略の方法論について紹介した。ここで紹介した信頼性重視保全(RCM)、ライフサイクルコスト(LCC)評価およびリスクマネジメントフレームワーク(RMF)は、膨大な既設設備からなる全体システムの防災保全対策を、どう合理化してコストダウンに貢献するかという視点からの方法論である。マルチリスクに対するダメージが大きいと想定される部分はどこにあるのか？、損害による影響力が大きい地域や部分はどこになるのか？、費用対効果が大きくなる地域や個所はどこになるのか？を勘案し、対策の重点化を図る方法論である。この考え方は、従来のように与えられた一律の基準を満たす仕様規定的な対策から脱却し、個々の設備対策の差別化を図る性能規定的な対策へ、防災保全政策の転換を図ることを意味している。

本論で取り上げた方法論は、確率論をベースにするリスク評価技術を基本としている。しかし、リス

ク評価は、常に、不確実性を含む評価を含んでおり、その評価精度を議論することは難しい。このような問題に対処するには、必要なデータを蓄積することはもちろんであるが、多角的な視点からその妥当性を議論できる評価技術の開発が今後ますます重要となると考えられる。

参考文献

- 1) 数表で見る東京電力, 東京電力株式会社 広報部, 平成 13 年度.
- 2) Smith, M., A., Reliability Centered Maintenance', McGraw-Hill, Inc, 1993.
- 3) Reliability, Risk and Probability Applications Subcommittee, Impact of Maintenance Strategy on Reliability, IEEE Committee Report, 1999.
- 4) ライフサイクル保全研究会'ライフサイクル保全に関する研究', 社団法人 日本プラントメンテナンス協会, 1995.
- 5) 小野, 伊藤, 弘津, 米国原子力発電の運転保守コスト分析手法の開発, 電力中央研究所報告, 研究報告 P99001, 1999.
- 6) 電力土木施設のライフタイムサポート技術の構築, 電力中央研究所-電源開発株式会社 共同研究 中間報告書, 平成 13 年 4 月.
- 7) 建設大臣官房官庁営繕部監修, 改訂建築物のライフサイクルコスト, 財団法人建築保全センター, 財団法人経済調査会, 2000 年 5 月.
- 8) 仁科一彦, 現代ファイナンス理論入門, 中央経済社, 1997.
- 9) Dixit, A. K., Pindyck, R.S., Investment under uncertainty, Princeton University Press, 1994.
- 10) 山本大輔, リアルオプション, 東洋経済新聞社, 2001.
- 11) Chang, S. E. and Shinozuka, M., Life Cycle Cost Disaster mitigation and maintenance strategy for electric power facilities on the basis of risk management concept

Yoshiharu Shumuta

This paper presents recent major studies related to the disaster mitigation and maintenance strategy for electric power facilities on the basis of risk management concept. Compared with large-scale civil engineering structures, electric power facilities are characterized by short life cycles and huge numbers. In order to reduce their maintenance cost maintaining the supply reliability against multi-risks including earthquake risk, methodologies called Reliability Centered Maintenance and Life Cycle Cost assessment are introduced and are discussed their applicability. Author's recent study for the rational renewal planning of substation equipment is also illustrated to deal with low frequency but large-scale earthquake. The methodologies introduced in this paper are expected as an effective decision-making support tool to reduce the maintenance cost in electric power companies.