

放送通信設備の防災に向けた信頼性設計

若 井 一 顕

第一工業大学 情報電子システム工学科 教授 〒899-4395 鹿児島県霧島市国分中央 1-10-2

Tel 0995-45-0640 E-mail k-wakai@daiichi-koudai.ac.jp

Reliability design for disaster prevention

Broadcasting communication facilities

Dr. Kazuaki WAKAI

Department of Information and Electronic Systems Engineering Daiichi Institute of Technology

Tel +81-995-45-0640 E-mail k-wakai@daiichi-koudai.ac.jp

Abstract: 3/11/2011 East Japan earthquake has increased the importance of reliability design for the facility, said. Optimal installation of reserve facility, including redundancy given and difficult challenges. Want to describe in a dogmatic point of view to design facilities for disaster prevention broadcasting telecommunications facilities in this paper, based on my experience. The thought portion becomes reference very much a part of it and think that I would appreciate the many opinions. The paper will be writing to the Broadcasting magazine series as from 2014, may.

Key word: broadcasting facilities, reliability, redundancy, disaster prevention, earthquake, torrential rains.

1. まえがき

2011年3月11日の東日本大震災を受けて、設備に対する信頼性設計の重要性は増してきた。設備の予備系を含む冗長性の最適な設計は難しい課題である。

本論では放送通信設備の防災に向けた設備設計の在り方を、筆者の経験を踏まえた独断的な視点で記述したい。大いに参考になる部分、拘りの部分もあろうかと考えるが多くのご意見が頂ければと考えている。本論文は2014年の5月からの放送専門誌への連載に向けた皮切りとして書き下ろしたものである。

2. 近年の災害の記憶

古い話で恐縮であるが、私が放送設備の設計、管理に携わっていたころの多くの災害が思い起される。

時系列的に挙げてみると1995年1月17日、5時46分に発生した阪神淡路大震災、2000年6月始まった東京都・三宅島の噴火そして9月には全島民退避。2004年

10月23日の17時56分に起きた新潟県中越地震新潟、記憶に新しい2011年3月11日、14時46分に起きた東日本大震災がある。テロでは1995年3月20日の地下鉄サリン事件、2001年9月11日に起きたアメリカの同時多発テロなどがあった。その時代で間接的、直接的に業務対応に追われたことを思い出す。間口を広げ過ぎて本論の方向性が見えなくなっては本末転倒であるので、ここでは自然災害と設備がどう対峙していくかを考えていく。

3. 総務省の検討案

平成25年(2013年)7月26日に総務省から出された「基幹放送の設備に関する安全・信頼性に関する技術的条件」の内容を確認してみたい。

3. 1 放送における安全・信頼性に関する技術基準の位置づけ

「放送は、緊急災害時を含め、日頃から国民生活に必需の情報をあまねく届ける高い公共性を持ち、安全・信頼性が求められることから、放送を行うための電気通信設備に対し安全・信頼性に係る技術基準を定め、技術基準適合性を審査し、運用に当たり適合維持業務を課すもの」とある。放送法施行規則第102条から115条にかけて中波放送、短波放送、超短波放送、コミュニティ放送、地上デジタル放送、衛星基幹放送、移動受信地上基幹放送に係る安全・信頼性に関する「技術基準」が示されている。放送法施行規則では以下の内容が記載されている。

- ・第104条 予備機器等
- ・第105条 故障検出
- ・第106条 試験機器及び応急復旧機材の配備
- ・第107条 耐震対策
- ・第108条 機能確認
- ・第109条 停電対策
- ・第110条 送信空中線に起因する誘導対策
- ・第111条 防火対策
- ・第112条 屋外設備
- ・第113条 放送設備を収容する建築物
- ・第114条 耐雷対策
- ・第115条 宇宙線対策

以降は放送メディアやその設備規模に応じて特例を規定している。

- ・第116条 中波放送
- ・第117条 短波放送
- ・第118条 超短波放送（コミュニティ放送を除く）
- ・第119条 コミュニティ放送
- ・第120条 地上デジタルテレビ放送
- ・第122条 衛星基幹放送
- ・第123条 移動受信地上基幹放送

3. 2 放送設備の安全・信頼性に関する技術基準

本論では個別メディアや個別の機器についての詳細は論じないが、この部分は専門誌への拙著の連載をご一読願いたい。現場経験に基づいた内容や具体的な対策を展開する予定である。既設設備への対策はコス

トパフォーマンスの視点からも重要である。3年前の東日本大震災を経験して冗長系の重要性と設置の必要性は論を待たない。

4. デジタル時代のメンテナンス

近年更新された中波大電力送信機を見学した。大電力設備であるから耐圧と大電流には十分な配慮がなされていた。多くの経験の中から最適な解に近づけた設計である。電力効率が以前の真空管装置に比べて格段に向上している。中波の送信設備は、真空管のグリッド変調から終段プレート変調方式に代わり、バイポーラトランジスタやFETを使った固体化のシリーズ変調方式、そしてPWM方式による音声変調信号増幅部の効率を改善する努力が払われてきた。このような変遷の中で高電圧の使用箇所は無くなり、代りにデジタル送信機では大電流を扱うことになった。

4. 1 大電力設備の電圧機器から電流機器へ

私が放送局に入って最初に見たのが9T38という三極管であった。プレートには10数kVの高電圧を印加して使用する。高周波増幅段と音声信号増幅段に用いていた。音声信号の増幅段はB2級のプッシュプル増幅器である。B2級とは、音声のドライブ信号のピークでグリッド電流を流すから、ひずみの低減の目的でドライブ段増幅器の出力インピーダンスを低くする必要があった。カソードフォロワーの直結回路であり、グリッドへの負バイアス電圧の与え方を工夫していた。オーディオに興味のある方ならロフチンホワイト回路など思い浮かべるかもしれない。旧来の真空管送信機が電圧機器であるならデジタル送信機は電流機器ということが出来る。図1に大電力中波送信機（数百kW級）の特徴を表現した。日本で最大の中波送信出力はNHK 菖蒲久喜ラジオ放送所の第2放送の500kWである。送信機は数年前に個体化のデジタル送信機に更新された^[1]。

図2は中波のデジタル送信装置の全体構成である。デジタル処理型送信機を除いて周辺回路については真空管装置と大きく異なる部分は少ない。多数の固体化PAを合成する回路の出力インピーダンスが低いのが特徴と考える。

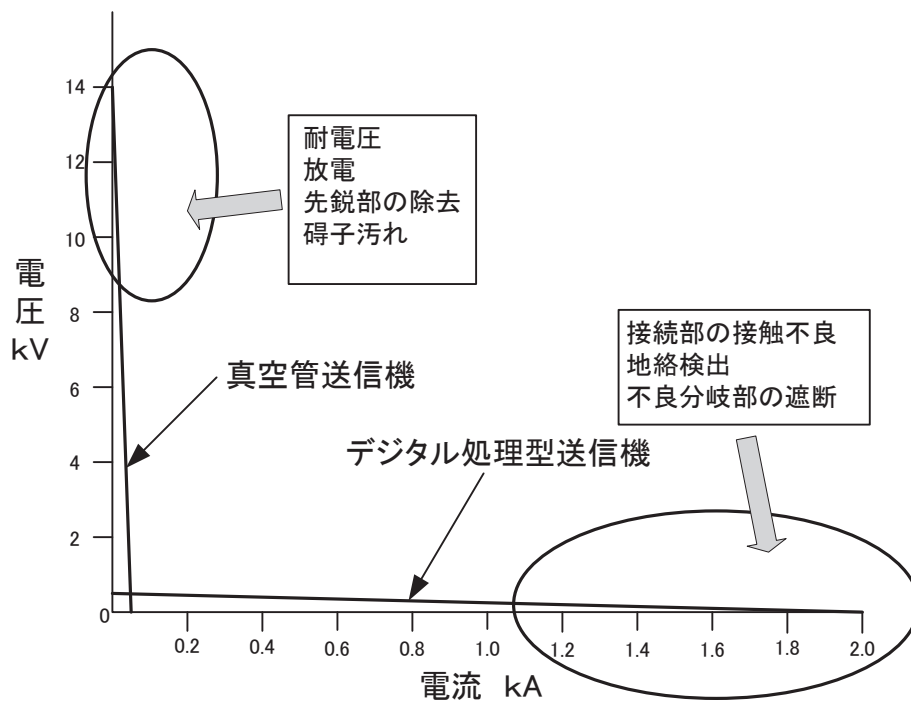


図1 大電力真空管送信機とデジタル処理型送信機との比較

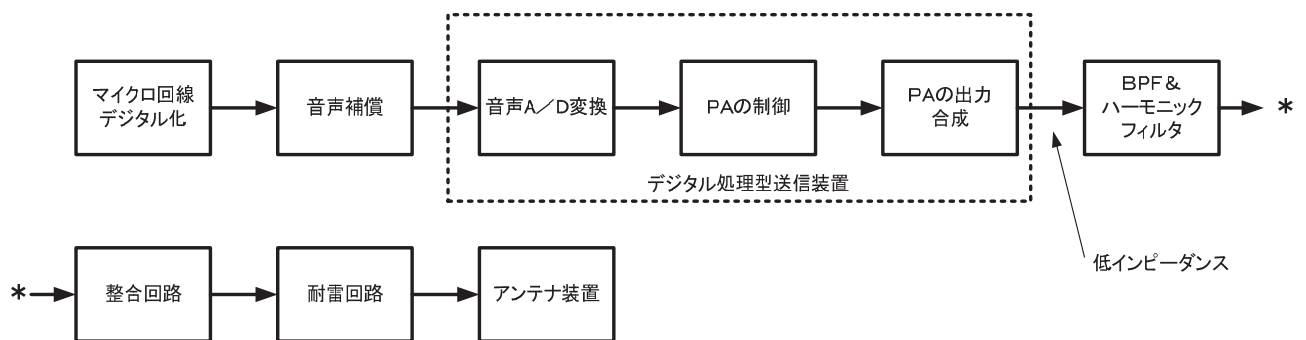


図2 中波デジタル処理型送信機の構成

4. 2 信号処理と特性管理

デジタル処理型送信機のデジタルである所以は、音声アナログ信号をデジタル信号化して、多数の固体化高周波 PA（電力増幅器）の ON/OFF 制御を行うことに帰着する。高周波の合成出力になるから切替え時の搬送波の連続性などが重要である。音声のプログラム信号は一般的にマイクロ波 STL 回線で送信所に伝送される。近年ではデジタル化された回線を用いているから、回線に復調系を持たずに直接デジタル送信機をドライブすることも可能かもしれない。後進のアイディアに期待したい。どのようなシステムを構成するかアイ

ディアは幾つかあると思うが、デジタルでシステム全体が串刺しにされたときに、音声信号と送信機とのバッファ部が無くなりリスクがあるようにも考える。現在の中波送信機はデジタル放送（デジタル信号伝送）ではないし、デジタル処理による電力変換装置であるだけに選択が難しいと云える。

4. 3 障害部分の特定

中波のデジタル処理型送信機は、固体化 PA を数百台も使用して、300kW や 500kW の送信出力を生成するため、一つひとつの PA の特性劣化障害を特定する方

法が難しい。逆に数台の PA の故障程度では、サービス品質に大きな影響を与えないという利点もある。1 台の PA 劣化が雪だるま式に障害を拡大しなければ、偶発故障として管理することが可能である。固体化 PA が ON または OFF のままでフリーズしてしまう様な障害も考えられる。定期点検による障害部分の発見、リアルタイムでの障害監視を採用するかは、技術的に有効な手法の開発と監視設備への投資効果にも配慮が必要である。多額の費用をかけずに定期点検と目視点検で発見できる場合もある。カタストロフィックな障害に発展しなければ、ひずみ率の悪化、効率の低下など、劣化を検出できる要素は数多く存在する。その他にも送信装置を構成するユニットは多い。出力合成変成器、BPF 回路、整合装置などである。刃型切替え装置などは可動部分があり重要な管理対象の一つである。

4. 4 メンテナンスの重点項目

アナログ送信装置、デジタル送信装置といっても、高周波のエネルギーを生成する大きなエネルギー変換系であることは変わらない。デジタル送信機はアナログ音声信号を A/D 変換器でデジタル信号にして多数の固体化 PA の ON/OFF 制御を行う。私の経験では高周波系のインピーダンス値に違いがあるので電圧要素で考えるか、電流要素で考えるかがポイントである。アンテナ周りの整合回路はアナログもデジタルも変わるところは無いが近年だいぶ手厚い耐雷設計がなされている。インピーダンスが低い系では電流が大きいので、接続クリップ部、接続線路の発熱に注意する必要がある。これらは高周波に限らずに、固体化 PA に給電する直流電源についても同様である。トータルでは数千アンペアの直流電流が流れることになるので接続部の緩み等による発熱は許されない。

高電圧部分は、PA の出力合成回路、並列合成回路、及び整合回路が考えられる。磁器コンデンサの耐電圧設計、コイルの先端箇所には要注意である。号機切替え部、及びアンテナ基部切替え部においては、高電圧が印加されているから、切替え機のブレード、刃受け部の劣化、先端部に電界集中が起こらない機構を採用する。高電圧部分は当然インピーダンスが高い箇所

ある。アンテナ基部電流計などの実装指示値が低インピーダンスでの校正値に比べて微妙に異なることがある。ストレーキャパシティや漂遊金属（電位が不定な部分）には注意を要する。

4. 5 障害の蓄積と分離

障害が蓄積されることを前提に議論を進める。高周波整合回路は、磁器コンデンサとコイルの組み合わせである。サージ吸収用の抵抗素子も回路に組み入れることもある。以前は磁器コンデンサの金属端子の半田接続部の経年劣化による剥離が散見された。メーカを指導して最近では改善品が現場で使われている。しかし、点検では剥離、裏面の放電跡の確認も重要となる。コンデンサの多段積み接続は避けるべきであるが、構造的に採用する場合には銅板による支持方法、端子の締め付けトルクにも注意する必要がある。大型のコイルではコイルクリップが緩んで回転し巻き線間をレアショートすることは少ないが、その部分も点検・監視のポイントである。コイルの変色も有効な監視部分である。示温塗料の塗布や示温紙などの添付も有効である。但し高電圧部分での示温紙の剥離は先端での電界集中を伴うので使用したくない。接続線路や接続ケーブルの曲率半径にも注意したい。接続用の銅板を緩やかに曲げても、薄い銅板エッジの曲率半径は小さいままで電位傾度が高い。この部分でコロナ放電が発生し近接した金属部との間でアーク放電を誘発しないように配慮すべきである。コロナリングや袋ナットを多用することもないが、エッジ部の電界は高いと考えるべきである。

中波デジタル送信機の電源回路は、低電圧、大電流である。低電圧の直流と云っても 300V 程度はある。劣化部品としては電解コンデンサが考えられる。従って定期的な交換と熱対策が重要となる。一般的に電解コンデンサは 7～8 年での交換が必要と云われている。抜き取り検査による劣化確認も重要である。

4. 6 耐雷・サージ対策

固体化送信機とアンテナとの間には、耐雷回路、HPF、そして放電ギャップを付加した整合回路が実装されている。アンテナから入った雷サージは直接的に固体

化PAにダメージを与えることは少ないと考えてよい。以前、固体化送信機をトーン信号で100%変調して、アンテナ基部を強制短絡して固体化PAの電圧・電流トランジェントを測定したことがあった。アンテナ整合回路の特定箇所で短絡接地すると、固体化PAのサージ電流が最大に達することが確認できた。このような現象を解析して半導体素子のASO（安全動作領域）の範囲を超えないことを確認する他、ジュール熱の計算を行った。最悪条件を回避するには、高速な過負荷保護制御、高速サージプロテクタ制御を組み合わせるしかない。雷による影響は瞬間的な現象が多いが、アンテナ系の不整合が緩やかに発生する場合には別の対策が必要である。例えば自然現象（豪雨、雪、風、塩害等）等についても検討が必要となる。

4. 7 劣化部の特定と管理の中心になるもの

近年の中波送信機はデジタル型に殆どが移行されている。数年前に専門誌に執筆した「中波デジタル処理型ラジオ送信機への歩み」を読み返してみた。真空管を懐かしむ筆者のこだわりも多いが、アナログ送信機とデジタル処理型送信機の特徴比較が書かれているので後進には役に立つのではと思っている。大電力のデジタル処理型送信機の運用実績やノウハウも現場に多く蓄積されているのではと思う。送信機については、劣化部の特定を実運用で行うか、定期点検で行うかに分かれる。劣化のしきい値が運用の基準（電波法、自局の運用基準）を下回らなければ一刻を争う必要はない。この点がデジタル処理型送信機の有利な点である。多数のPAを持つから個別の特性劣化が希釈される。予防保全として、これらの個別故障の特定と保全の迅速性と併せて研究するのも面白い。次に定期点検による特性変動、経年劣化の検出である。従来の測定方法によっても簡易な障害は発見できる。管理値割れに至らなければ放置できることになる。頻繁な過負荷試験を行って寝た子を起こすこともない。今後は効果的な抜き取り検査などで、個別PAのパイロット点検などが有効と考える。

4. 8 新しい設備管理の考え方

コンピュータを使った監視装置などで、重要個所の

電圧、電流のロギングデータから経年劣化を推定することも可能である。これらのデータを効果的に処理してメンテナンスに生かす工夫は今も昔も変わらない。定時の時報音でのシステム監視をしたことがあった。S/N、ひずみ率、キャリアシフト程度は簡単に取得できる。電力効率の算出も可能である。障害発生時の忌まわしい経験は思い出したくないが、現場では急激な状況変化に対して迅速な対応が求められる。日頃の経年劣化を読み取れずに突発的な障害に至った場合は管理運用者の分析の甘さがある。外的要因障害は年間に数件程度はあるが、落雷など事前の対策を超える想定外の大規模なものもある。このような場合には設備の2重化は有効である。監視装置、ロギング装置があっても、突然出力される障害データに現場は混乱し迅速な判断が出来ないことがある。日頃の訓練が生かされる部分である。障害時の設備切替え、復旧、待機、確認動作等をPLCなどに制御ロジック化してあるが、大規模な雷サージの影響を受ければロジック回路が正常に動作する保証はない。

障害時にシーケンスが破綻した場合のバックアップは人的な対応に委ねられる。マン・マシンのインターフェースの簡易化、学習の継続が有効であると考ええる。今は現場で達人を求める時代ではないから、分かり易い構成によって誰もが容易に判断できるシステムとすべきである。

5. 信頼性と設備管理

システムの信頼性指標の一つにRASIS（ラシス）がある^[2]。これらを放送設備に照らし合わせながら議論してみたい。

5. 1 Reliability（信頼性）

Reliability（信頼性）とは、システムが一定期間安定して動作する能力、故障の少なさということである。中波の送信装置を例にとっても、図3に示す2台化方式、3C2方式（2台並列1台予備の3台方式）、そして多段合成方式などの構成がある。プロフェッショナルの機器では1台運用方式では大変心許ないので2台化方式を採用することが多い。新旧の更新を向かえる時期ともなると予算次第では、部分更新などの選択も迫

られる。新旧併用での2台化方式のケースも出てくる。システムによっては3C2という方式を採用する。これは2台並列運転で1台が待機冗長系となる。システムを定期的に切替え運用することで部品劣化の均一化、動作確認を行っていく。切替えローテーションも計画的に実施することで、送信機に付随した切替え機（PGM, PCM、及び刃型切替え機等）の動作試験を行うことになる。切替え機の動作試験は重要である。送信機の障害を検出して制御回路が働き、切替え命令が出ても肝心の切替え機が不動作では意味がない。切替え機の動作確認を運用中に実施するのは難しいので一般的には夜間の放送休止時間帯で行うことが多い。切替え機は共通系の意味合いの強いサブシステムである。最近では小型切替え機の製造業者の確保が難しいなどの話を聞くことが多い。切替え機も超高速のものが出来れば放送サービスへの影響も少なくメリットが大きいと云える。その他、無停波切替え方式の採用も考えられる。3C2方式であれば原理的には可能であるが、完全無停波方式とするには切替え機の数が多くなるので信頼性確保の重要な論点でもある。3dBカップラを用いた位相合成方式を使えば、号機切替えをフェードイン・フェードアウトで行うことが出来る。テレビの送信システム等では用いられている例がある。

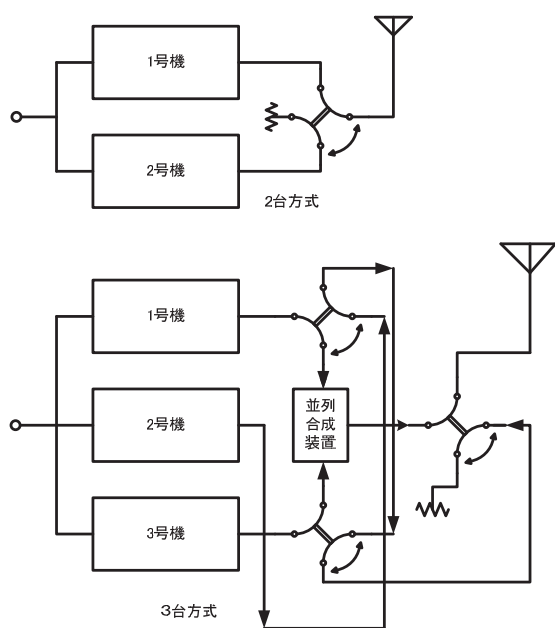


図3 2台方式と3台方式のシステム構成の例

5. 2 Availability (稼働性)

Availability (稼働性) は、システムが正常に動作している時間の割合をいう。稼働率を高めるために並列合成方式が考えられる。2台化より3台化、N台化という具合に並列台数を増加すれば稼働率は向上する。図4に基本的な直列、並列の稼働率の計算例を記述した。

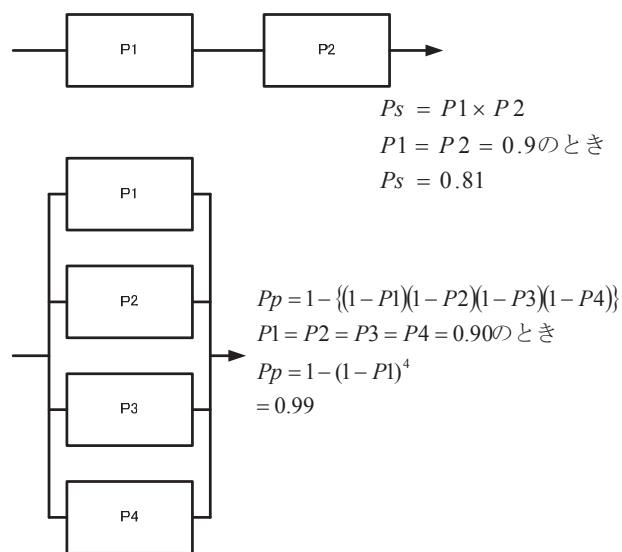
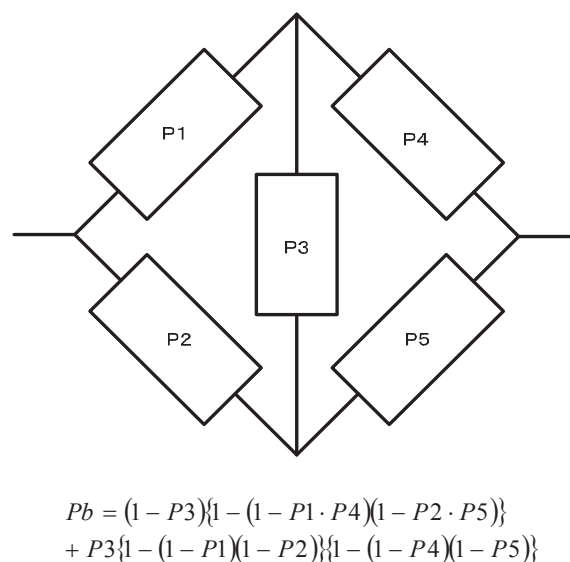


図4 直列と並列方式の稼働率の計算方法



$$Pb = (1 - P3) \{1 - (1 - P1 \cdot P4)(1 - P2 \cdot P5)\} + P3 \{1 - (1 - P1)(1 - P2)\} \{1 - (1 - P4)(1 - P5)\}$$

図5 ブリッジ構造型システムの稼働率の計算方法

並列合成方式は特に切替え機がなく、機器の障害時のサービス低下が少ない。最近の中波デジタル送信機

では、数 100 台の固体化 PA を合成しているから、PA の故障によるスプリアスの劣化、音声ひずみ率の劣化にさえ留意すれば管理基準値の限界まで使用は可能である。一般的に管理基準値は電波法の規制値より厳しく設定されているため放送サービスへの影響は少ない。図 5 にブリッジ構造型システムの稼働率の計算方法を示した。

5. 3 Serviceability (保全性)

Serviceability (保全性) は、システム故障時の故障箇所の発見、修理の容易さともいう。メンテナンス性ということもあるが、システムの障害は避けては通れない前提で議論を進める。多くの保全は、予防保全をベースにして実施されている。そのための定期点検の実施を愚直に励行するのが現場である。愚直とは言葉が悪いが予防保全のためのチェックシートの活用、巡回点検の実施、監視装置による運用データのロギングとデータ分析評価等がある。最近のマスコミ報道で JR の杜撰な路線管理が脱線事故に結びついたことは記憶に新しい。

機器が障害を起こした時には、その故障箇所の特定が重要である。短時間で発見するためにセンサや監視装置を活用している。監視を支援するためのエキスパートシステムの研究が一時期、流行ったが暗黙知のハードへの移植など難しい部分もある。それはそれとして、故障箇所を迅速に発見すること、それを簡便に修理する方法が明確であれば短時間で復帰が可能である。最近の機器はコンパクトにまとめられ過ぎていて故障した箇所に辿り着くまでに周辺部分の取り外しに手間の掛かるものがある。設計者にメンテナンスや修理の経験がないと、実機が寄木細工的な構造となり現場泣かせとなる。また予備品の手配も重要である。予備品も定期的の実機に使用して動作確認をしておくことが肝要である。更に人間が修理を行うことを前提とした機器内スペースの確保と機器配置、工具や治具の整備なども必要である。

5. 4 Integrity (完全性)

Integrity (完全性) とは、破壊からの保護、破壊されたときの修復の可否ということで説明されている。

コンピュータの関係でよく使われている言葉である。設備の障害は筆者も数多く経験をしているが、カタストロフィックな障害、自然災害、その中でも雷の障害は記憶に新しい。先にも述べたが設備信頼性の確保のためには、2 台化、若しくは 3 台化方式などが有効である。但しアンテナ系は整合器を含めて 1 台方式の局所が多いので、せいぜい頑張っても整合回路の 2 台化設置くらいかと考える。一つのアンテナに 2 波を給電する方法を採用している送信所では、2 重給電装置を 2 台化するというケースもある。大規模な障害に対しては、2 重化という選択肢がある。アンテナの予備を持つことは、同一敷地内ではアンテナ相互間の干渉もあり大変難しい。何かの工事で残置したアンテナを予備として確保している民放局もあるようだ。

最善の方法は、サイトダイバー方式を採用して送信所を 2 か所に設置する方法がある。関東エリアでは、サービスエリア世帯数も非常に大きいため、予備送信所を設置する例もある。但し、この方式では、アンテナ、局舎、送信設備、電源（自家発を含む）、及び付帯設備まで整備することになるから多額の投資が必要になる。予備送信所の設置は大規模な設備障害に対して頗る有効な信頼性向上策と考える。

5. 5 Security (機密性)

Security (機密性) とは、データやシステムの不正防止機能と云われる。コンピュータの世界でもこれらについて多くの対策が図られている。送信設備としては、プログラム回線の確保などが重要な部分である。中波送信所では AM 波を生成するための音声プログラムが切れないように回線の 2 重化、有線と無線の併用システムなどを採用している。プログラムについては、基本的に信号断、異種プログラムの混入等を避けねばならない。異種プログラムの送出回避は信号の送り手側がしっかりと管理しなければならない重要な部分である。非常災害時の信号ルートの構築方法も重要となる。

中波の夜間の電波伝搬は、電離層の関係で夜間に D 層が消滅するため、D 層での吸収が無くなり E 層での電波反射によって遠距離伝搬する現象がある。そのため、日本では隣国の中国や韓国からの放送波によって

干渉を受けることで、昼間のサービスエリアに比べて夜間のサービスエリアが極端に縮小する。現状では周波数変更、送信電力の増強、小規模局の設置などの対策を行っている。FM 波の補完置局や最近の IP ラジオも有効に活用できるメディアかもしれない。

6. 結び

最後に大電力送信設備の運用管理を実施してきた経験からリスク管理の視点を述べてみたい。事故や危機が起きないように対処することをリスク管理という。事故や危機的な状況が発生した後の活動を危機管理という。図6は、リスクにおける4態を描いてみたものである。一般的に、 $\text{リスク} = \text{発生確率} \times \text{被害規模}$ というかたちで表現される。また、 $\text{リスク} = \text{hazards/safety guards} = \text{潜在危険性/安全防護対策}$ である。

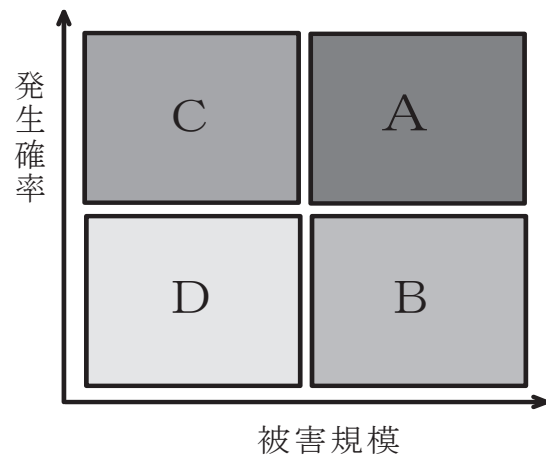


図6 障害規模と発生確率のリスクマトリクス

表1に、図6の各象限を解説した。

表1 設備障害の発生確率とリスク評価

領域	領域内容
A	顕在化した場合の被害規模も大きく、発生確率も大きいリスク 事例：雷、地震、津波、台風、など自然災害 対策例：耐雷、耐震、加重耐力の強化、設備のサイトダイバー化
B	発生確率は小さいが、顕在化した場合の被害規模が大きい領域 事例：大規模地震、台風、自然災害、火災、人為的災害（テロ） 対策例：耐雷、耐震、風力耐力の強化、定期点検、警備強化
C	発生確率は大いが、被害規模が小さい領域 日常運用で経験することが多い領域 事例：雷保護動作、誘導雷、過電流保護動作 対策例：監視システム強化
D	システムとしてそのリスクを許容しても良い領域・・・ 事例：原因不明アラーム、誤報 対策例：自家発の待機運転、アラーム収集・分析、形骸化排除活動、技術者の育成継続

設備の設計や運用管理に対して、どのようなことを想定して実機に反映させるかは難しい。雷対策をどこまで実施するか、あえて障害の弱点部分を設けて、その劣化箇所を早期に復帰させる方法もある。軽微な障害やアラームの発生は、人間系を煩わしくさせるが運用の形骸化は排除すべきである。

参考文献

- [1] 若井；中波デジタル送信機の設計と調整、放送技術、15 回連載（2008. 3～2009. 6）
- [2] 若井；デジタル時代のラジオ送信機の設計・調整と課題、日本信賴性学会誌、2012 年, Vol. 34, No. 2, pp108-120.