

1 2. 再生可能エネルギーの主力電源化に向けて

再生可能エネルギー主力電源化は可能か

再生可能エネルギー（RE）を主力電源にすることが政策課題になっている。前章までは現在利用可能な技術によって、系統の安定を維持しながら RE を大量に連系する方法論を述べたが、RE には導入限度があった。これは現在までの電力系統が同期発電機的能力に依存して発展してきており、それが能力の低い RE に置き換わっていくと系統の安定が保てなくなるからである。現在の技術では RE だけで安定に全負荷に供給することは不可能である。なぜなら、「RE だけで全負荷に供給している」ことが即ち「RE の単独系統」に他ならず、それが長時間に亘って安定維持できるはずもなく、ましてや「単独運転検出機能」が積極的に単独系統を不安定化するのであるから。「分散型電源はパラサイト」と称した技術者がいる⁽¹⁾が、正鵠を得ている。従って、RE 主力電源化という政策課題を実現するには、前章までと異なる技術的方策が必要になる。

電源の交流位相の重要性

「再生可能エネルギーの本格電源化」が政策課題となったものの、論点の網羅さえ出来ていない状況ではないか。重要な問いは、①再生可能エネルギーの導入限度は、いかほどか？、②導入限度を拡大する方策は何か？の2点であろう。

導入限度を規定する物理現象は色々考えられるが、本稿は一例として誘導機負荷の電圧安定性から見た導入限度について述べる。瞬時電圧低下（瞬低）時の観測結果から電気の半分以上は（交流で直に駆動される、つまりインバータ駆動でない）誘導機負荷に使われており⁽²⁾⁽³⁾、需要実態調査の結果⁽⁴⁾⁽⁵⁾とも良く一致している。然るにわが国では今もって電力系統解析・シミュレーションに誘導機負荷を模擬しない方法が横行しており、これはおよそ先進国と言える国々の中ではわが国だけである。そこで本稿は誘導機負荷が RE 導入限度を決める一つの要因になることを示し注意を喚起しようと思う。

RE はマイナスの負荷である まず指摘しておきたいことは、再生可能エネルギーの主体であるインバータ電源は決して電源ではなく、マイナスの静的負荷であるということである。同期発電機などの電源は、電圧 V ・周波数 f ・位相 δ が定義された内部起電力 $\mathbf{V}$ を持っている。数式で書くと $\mathbf{V} = V e^{j(2\pi f + \delta)}$ である。もし系統の電圧・周波数・位相が変化すると平衡が崩れ、本格電源は系統との間で有効・無効電力を授受しながら、新しい平衡状態へ移行する。

インバータ電源の位相は系統の位相に追従するよう制御される。位相の時間微分である周波数も、必然的に、系統の周波数に追従する。電圧は系統の電圧・周波数に応じた所定の有効・無効電力を発生するよう制御される。つまりインバータ電源は、系統の電圧・周波数に応じて所定の有効・無効電力を発生するのであるから、電力の発生・消費という点が違うだけで、静的負荷と同じふるまいをする。だからインバータ電源はマイナスの静的負荷なのである。なお「静的」とは、有効・無効電力が現在の電圧・周波数だけで決まり、過去の履歴に影響されないという意味である。そうでない負荷が「動的」負荷で、誘導機負荷がその代表である。

このような事情があるから著者の過去の研究⁽⁶⁾⁽⁹⁾では、インバータ電源はマイナスの静的負荷で模擬してきた。そのような簡潔な模擬であっても、実験による瞬時電圧低下時のインバータのふるまいをシミュレーションがよく再現できている⁽⁷⁾。

解析モデル 物理現象を解明する理論（仮説）にはモデルを用いる。モデルは問題とする現象が再現できる範囲でなるべく簡素なものがよい。現実を詳細に反映したモデルは複雑に過ぎるので、重要な

要素のみ残して理想化・抽象化するのが、科学の理論における常道である。

実在する大規模連系系統を、総電源対総負荷の形で縮約した、Fig. 1 の一機一負荷系統モデルを用いる。

無限大母線にあたる同期機は過渡リアクタンス X_i 背後電圧 V_i を一定として模擬する。発電機端子（電圧 V_g ）から系統母線（電圧 V_s ）までのリアクタンス X_{gs} は、発電機の主点圧器と電源線のリアクタンス X_g と、基幹系統リアクタンス X_s の和である。系統母線には基幹送電線の容量と変電所の調相設備容量の和 B_s がある。

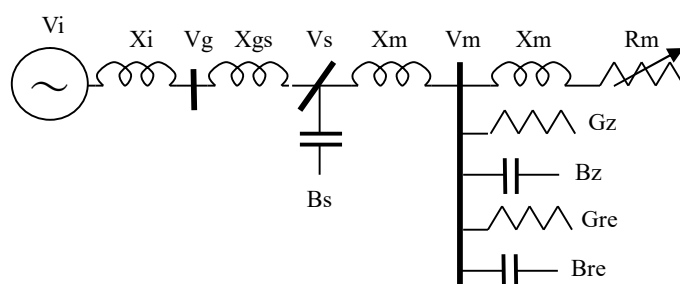


Fig. 1 Structure of 1 machine 1 load model

系統母線から負荷母線（電圧 V_m ）までのリアクタンスは X_m である。負荷母線には誘導機負荷、静的負荷、調相設備、再生可能エネルギーがある。誘導機負荷は定リアクタンス X_m 背後の可変抵抗 R_m で模擬する。静的負荷はコンダクタンス G_z で模擬する。調相設備はサセプタンス B_z で模擬する。再生可能エネルギー（RE）はアドミタンス $G_{re} + j B_{re}$ で模擬する。一般的には静的負荷も RE も定アドミタンス特性ではないが、本稿では簡単のために定アドミタンス特性を仮定する。この仮定は電圧安定性面では、静的負荷は楽観方向に、RE は悲観方向に作用する。観測によれば実在の負荷の（誘導機以外の）静的負荷は、ほぼ定アドミタンス特性であることがわかっている。また観測・試験によれば、RE は定電流特性に近いが、瞬時電圧低下時のふるまいは定電流よりは出力が減殺されて定アドミタンスに近づいており、従って定アドミタンス特性で模擬することには一定の理由がある。

Table 1 Power flow at the standard condition

V_i	X_i	V_g	X_g	X_s	V_s	X_m	V_m
1.105174	0.25	1.02	0.25	0.25	1.0	0.25	0.98
X_m	R_m	G_z	B_z	B_s			
0.190178	1.901782	0.520616	0.116682	0.14838			

誘導機負荷の消費電力が $P_m + jQ_m = 0.5 + j0.05$ ，静的負荷の消費電力が $P_z + jQ_z = 0.5 + j0$ ，RE 出力がゼロを基準状態とし、このときの潮流状況を Table. 1 に示す。

基準状態の同期機出力 P_g は 1.0 であるが、RE 出力が P_{re} に増加すると、 $P_g = 1.0 - P_{re}$ に減少する。このときリアクタンス X_i と X_g は同期機出力に反比例して増加させる。これで同期機が RE に置き換わっていく状況表現するわけである。潮流状況は変化するが、 V_g 、 V_s 、 V_m を維持するよう V_i 、 B_z 、 B_s を調整する。なお、RE の力率は配電系統の電圧変動を抑制するため $Q_{re}/P_{re} = -0.2$ とする。

トルク - 速度曲線 $V_m = 0.98$ のときの誘導機消費電力は $P_{m0} = 0.5$ (p.u.) であり、このときの回転数を $n_0 = 0.975$ ，抵抗を R_{m0} とすると、任意の回転数 n のときの抵抗 R_m は、 $R_m = R_{m0} (1 - n_0) / (1 - n)$ である。誘導機の電気入力トルク T_e は消費電力 P_m に等しい。機械出力トルク T_m は回転数の 2 乗に比例するものとし、 $T_m = P_{m0} (n/n_0)^2$ である。

基準状態において誘導機回転数を変化させたときの T_e 、 T_m 、および加速トルク $T_a = T_e -$

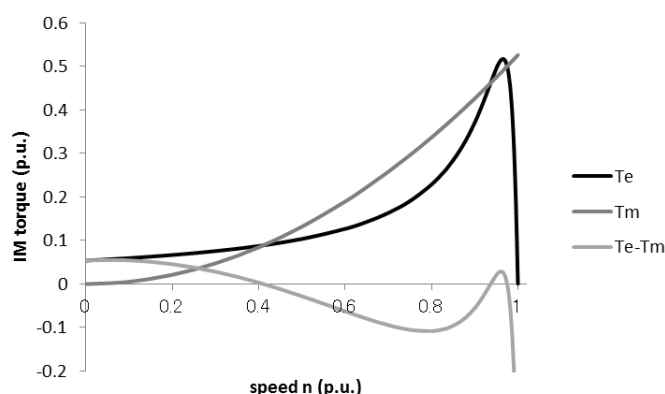


Fig. 2 Torque-speed curves at the standard condition

T_m は Fig. 2 のようになった。 $T_a = T_e - T_m$ が正の領域は $n_0 = 0.975$ の低速側にわずかに存在している状態で、電圧安定性はよくない。

そこへ RE を導入すると Fig. 3 のようになった。 $n_0 = 0.975$ 付近を拡大表示してある。RE 出力が -0.4 ではぎりぎり安定であり、RE 出力が -0.6 では明らかに不安定である。

RE が固有の交流位相を持たず、自らの位相を系統の位相に追従させるという制御を行っている限り、RE はマイナスの負荷にすぎず、

決して電源と呼べるものではない。現下の RE は誘導機負荷を駆動できない。このまま RE が系統電源（同期機）に置き換わっていくと、いつか誘導機負荷の電圧不安定に至る。

不安定を回避するには RE が固有の交流位相を持つ以外に解決策はない。例えば仮想同期機という発想があり、それが訓練用水力発電シミュレータ⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾において半ば実現していることは、前章で紹介した通りである。

なお、本稿は一機一負荷系統モデルに簡略化した解析であり、もっと詳細なモデル、例えば同期機の諸定数や励磁装置の特性を考慮したモデルでは、別種の不安定現象が生じる可能性は十分ある。さらなる研究が必要なのは当然だが、シミュレーションだけでは不都合な現象のメカニズムの把握が難しいので、本稿のような、手計算（の延長）による解析の併用が必要であり、この種の解析を行いうる数学・物理学・電気工学の水準を維持していくことも必要である。

周波数上昇許容の効能

交流系統であるから、維持すべきは電圧と周波数である。電圧維持については前節で述べた。本節は周波数維持を扱う。LFC（Load Frequency Control）は電力系統で最も成功した技術の一つであることは疑いなく、わが国のような小規模系統でも $50 \pm 0.2\text{Hz}$ 、 $60 \pm 0.1\text{Hz}$ という小さな変動に抑え込むことができている。

$50 \pm 0.2\text{Hz}$ が、どれほどの高精度であるか考察してみよう。音楽の「半音」の周波数比は $2^{1/12} = 1.05946$ である。 50.02Hz と 50Hz のア風は数比は $50.02/50 = 1.0004$ である。後者は前者の $1/149$ にすぎない。ベルトで同期電動機の回転を落としてアナログレコードを駆動する装置は系統周波数の変動で回転数も変動するが、 $50 \pm 0.2\text{Hz}$ という精度ならば、耳の良い音楽家が聞いても変動がわからない。さらには周波数偏差を積分した「時差」も制御され、交流で駆動する電気時計の誤差も抑制されている。

ところが現代では音響機器はサーボモーターで駆動され、電気時計は電波時計に置き換わっており、系統周波数の多少の変動は問題にならない。多くの電気機器は周波数偏差を 5% まで許容している。同期機もそうである。それならば、多少の系統周波数上昇を許容することが、RE 本格電源化を支援することになるのではないか。周波数低下は、例えば連系線の遮断などの制御があるので、回避した方が安全であるが、周波数上昇は低下ほど影響が大きい。

調速機運転の種類 系統周波数の維持に調速機（Speed Governor）は欠かせない。ガバナ（調速機、Speed Governor）の運転方法には各種あり、それにより周波数制御機能は異なる。代表的なガバナ運転方式を Fig. 4 に示す。系統電源はいずれかの方式を装備しており、調停率 δ は平均的に 0.04 程度、開度上限 P_U は高々 1.2 程度であるから、よほど特殊な事情がない限り、系統周波数が 5% 以上に上昇することはな

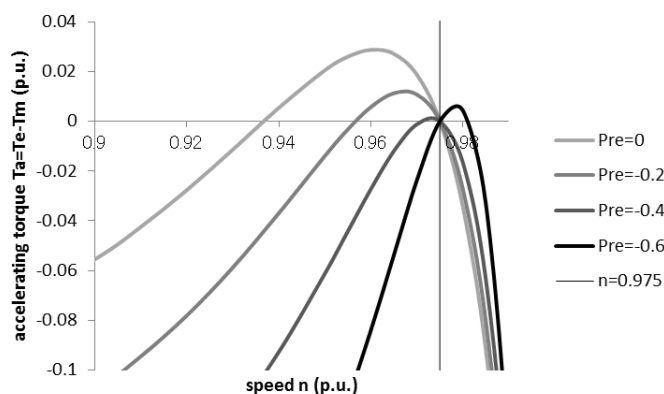


Fig. 3 Torque-speed curves by RE output

い。そのように系統電源のガバナ機能は設計されている。调速機運転の種類と特徴をよく知ることが、ひいては RE 主力電源化を支援することとなる。3 種類の调速機運転を Fig. 4 を援用して説明する。

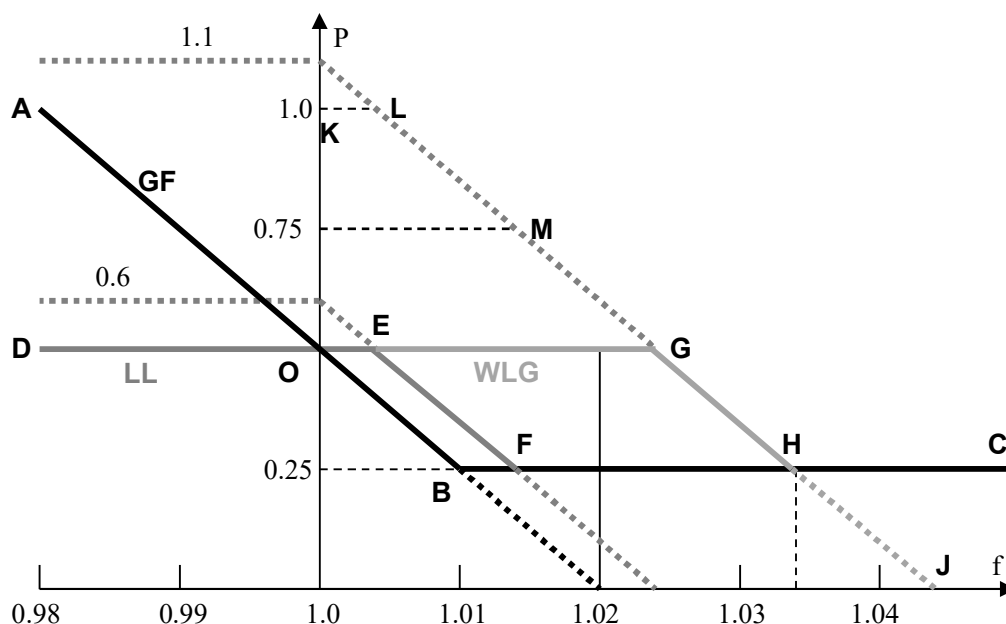


Fig. 4 Power-frequency character of speed governor

(1) ガバナフリー運転 (Governor Free, GF) いま基準周波数 1.0, 出力 0.5 で運転している (O 点)。周波数が低下すると O→A へ移行する。つまり出力は増加する。周波数が上昇すると O→B→C へ移行する。出力は減るが、BC 間ではボイラなどの出力下限により下げ止まる。ふつう出力と周波数の関係は $4\%f/100\%P$, つまり 4%の周波数変動により 100%の出力変動が生じる。この 4%という値を調停率という。貯水池式水力やガス火力に用いられる。

(2) ロードリミッタ運転 (Load Limiter, LL) ロードリミッタは現在出力 0.5 プラス 0.1 の 0.6 に設定されているとする。周波数が低下すると O→D へ移行する。つまり出力は増えない。周波数が上昇すると O→E→F→C へ移行する。出力は減るが、GF ほどには減らない。FC 間はボイラなどの出力下限である。原子力や石炭火力に用いられる。

(3) レベルガバナ運転 (Water Level Governor, WLG) これは自流式水力に多用され、周波数により設定される出力設定器 (65P) は基準周波数にてガイドベーン最大開度 (図では 1.1) に設定される。水槽水位が望ましい範囲に収まるよう、出力制限器 (77M) により流入量に見合った出力にする。周波数が低下すると O→D へ推移するのは LL と同じである。周波数が上昇すると O→G→H→C へ推移する。LL に比べると周波数がかかなり上昇しないと出力削減を開始しないが、それでも (出力下限がなければ) 周波数 1.044 にて出力はゼロになる。

RE には WLG 機能が標準的に装備されている (それが世界標準だから)。出力下限がないから、周波数低下時は O→G→H→J へ推移する。ただしわが国に限り RE のこの機能を活用していない。

数値計算例 RE の WLG 機能の効能を数値計算例で確認してみる。需要 1.0 に対し、RE は定格出力が 1.0 で現在出力が 0.5 で、系統電源は定格出力 1.0 で現在出力 0.5 で運転している。RE が出力ゼロになっても供給支障を生じないように系統電源に十分な予備力を持たせている。系統電源は LFC 運転している。ここで RE 出力が 1.0 に増加したとする。系統電源は出力下限 0.25 まで出力を抑制するが、まだ 0.25 だ

け発電過剰である。

(1) RE が定出力のとき 0.25 の発電過剰は周波数上昇に伴う負荷消費電力の増大で吸収される。周波数上昇 1%に対し負荷増が 2%になることが観測されている。負荷の 1.0 の需要が 1.25 に 25%増えるには、周波数上昇は $25\%P \times (1\%f / 2\%P) = 12.5\%$ となり、周波数は 1.125 (60Hz 計なら 67.5Hz) になる。これは許容できない。

(2) RE が WLG 運転のとき 仮に周波数上昇に伴う負荷増がないと仮定する。RE は K→L→M へ推移する。RE の速度調停率を 4%、負荷電力の周波数感度を $2\%P / 1\%f$ とすると、周波数は

$$1.004 \text{ (L 点)} + 0.25 / (1/0.04 + 2) = 1.01326$$

となり、60Hz なら 60.80Hz に相当する。これだけ極端な RE 発電増を考慮しても、RE の WLG の効能により、周波数上昇が 0.8Hz に抑えられるのであるから、RE に標準的に装備されている WLG 機能を生かすことは急いだ方がよい。日常的に 60.8Hz になるのは困るが、発電過剰（下げ代不足）の場面でだけ周波数上昇を許容するのは、相談の範囲内ではないか。そうすれば、下げ代を気にして系統電源に持たせる予備力を少なくし、RE の予期せぬ出力減に際して予備力不足になったりすることが避けられる。電源は、系統電源も RE も多めに運転しておき、下げ代よりも予備力を重視すればよいのである。

なお、わが国の系統連系規程は電力系統がわかった人物が参加せずに作られた経緯があるので、早急に全面的改訂すべきものとする。

文献

- (1) 飯島明彦：「分散型電源はパラサイト電力系統からの警告」，エネルギーフォーラム，2003
- (2) 上田智之・駒見慎太郎：「物理的構造と観測データに基づく電力系統の動的負荷モデル」，電気学会論文誌 B, Vol.126, No.6,, pp.635-823 (2012)
- (3) 水尾謙介・駒見慎太郎：「電力系統におけるモータ負荷のパラメータ同定精度向上」，電気学会論文誌 B, Vol.132, No.1,, pp.71-76 (2012)
- (4) 富士経済：「電力使用機器の消費電力に関する現状と近未来の動向調査」 (2009)
- (5) エネルギー総合工学研究所：「平成 21 年度省エネルギー設備導入促進事業（エネルギー消費機器実態等調査事業）報告書」，(2010)
- (6) 上田智之・駒見慎太郎：「分散型電源大量導入時における動的負荷の安定性解析」，電学論 B, 127 巻 2 号, pp.371-378 (2007)
- (7) 上田智之・駒見慎太郎：「系統負荷の短時間電圧安定性を改善する分散型電源の動的電圧維持機能の実験的評価」，電気学会論文誌 B, 128 巻 5 号, pp.761-768, 2008
- (8) 上田智之・駒見慎太郎：「分散型電源大量導入時における動的負荷を考慮した過渡安定度」，電学論 B, 126 巻 10 号, pp.969-976 (2006)
- (9) 山岸，駒見：「動的負荷と分散型電源を考慮した電力系統の動態安定度解析」，電気学会論文誌 B, 126 巻 10 号, 2006, pp. 977-984
- (10) 駒見，高松，早川：「訓練用水力発電シミュレータの開発」，電気新聞，1996 年 8 月 1 日，第 8 面
- (11) 高松，早川，原野，駒見：「訓練用水力発電シミュレータの開発」，北陸電力研究開発報告，第 2 号，pp.14-19, 1997

おわりに

古典的手法を少し拡張した解析による結果と、近代的なシミュレーションの結果が、これほど良く一致したのは、著者も正直言って驚いている。近代的なシミュレーションが使えなかったため様々な解析手法を編み出した先人の知恵には敬服するばかりである。古典的解析手法は単に答えを出すだけでなく、物理現象に対する洞察も与えてくれる。極論すれば、シミュレーションは、古典的解析手法を使える人だけに使う資格がある。物理現象への洞察を欠いたシミュレーションは、常に誤りとその看過というリスクを抱えているからである。しかしその重要性にもかかわらず、古典的解析手法は後継者を失いつつある。仏法ではそういう状況を末法と呼んだ。教義が衰え、後継者がいなくなり、経典だけが残る状況である。それが更に悪化して経典さえも散逸すると滅法になる。著者は本書を電力系統技術の末法時代に1つの経典として残したつもりである。

ではなぜこのような重要な技術が減びようとしているのだろうか。1つの理由は、シミュレーション技術の完成が古典的解析手法の必要性を減じたことであろう。理論やその背後の物理的な意味を知らなくても、とにかくシミュレーションで答えが得られさえすれば、誰もがそれを信用してくれるので、難しい理論や物理学は無用である。春秋の筆法を借りれば、シミュレーション技術はそれを創造した技術者を滅ぼした、ということになる。かくて現代は「シミュレーション屋」の全盛時代である。しかし考え直してみよう。シミュレーションはユーザーがデータを与えなければ答えを出さない。ユーザーは必ずしも電力系統の専門家ではなく、シミュレーションというゲームの取扱説明書をマスターしているだけで、ゲームというヴァーチャル・リアリティーの世界の住人である。そういうユーザーが電力系統の実態を反映した妥当なモデル、データを用いているという保証が、どこにあるだろうか。信用している人は噴火口の上で昼寝をしているのかもしれない。

電力系統は変容している。今日の正しいモデルも明日は間違いかもしれない。著者は現代が変容の時期と思っている。旧式の火力の廃止と分散型電源、再生可能エネルギーの大量導入がそれである。両者は電力系統の電圧支持能力を減退させ、電圧・同期・動揺安定度を悪化させる。伝統的シミュレーション・モデルはこのリスクを見逃す。そこで著者は新しい、電力系統の実態を反映したモデルを使ってみた。その結果は驚くべきものになった。また時間的に出力が一定しない再生可能エネルギーの大量普及が電力系統の電圧や周波数の維持を脅かしかねないことは誰もが理解できるのが、その程度を定量的に把握することがなかなか進まないようなので、仕方なく著者が自ら解明した次第である。内容は逐次、論文発表し、本書の各章に述べたので、参考にされたい。

自然科学という学問がなぜ大成功を収めたか研究するのが科学哲学である。科学には科学の優れた方法論がある。科学的に行うということは説明責任を果たすということに近いと思う。ところが昨今のわが国では科学者らしき人が非科学的発言をするのが見られる。原子力規制委員会の活断層断定論などが代表で、説明責任を果たしているようには思えない。しかし翻ってわが身を振り返ると、電気事業は再エネ連系問題について科学的アプローチをしてきたか、説明責任を果たしてきたかを問うと、汗顔の至りということになりはしないだろうか。その中で著者ひとは科学的であることに徹してきたつもりである。研究成果は査読付き論文として発表している。これは疑似科学ではないことの有力な証しである。自主出版や技術報告で情報発信すると、その内容は精査されていないため、無用な誤解を招くおそれがある。影響度の大きい研究成果はぜひとも査読付き論文として出版すべきである。情報の受け手である電力会社の技術者の側も、査読付き論文と自主出版・技術報告の差異を知っておくべきであろう。

本書で扱った内容は決して高度なものではなく、難解でもない。普通の研究者なら誰もが思いつく水準のものと思う。ではなぜかくも大勢存在する職業的研究者諸氏が著者より先にこのような結論を導き出していないのか？という点については著者も長年わからなかったのだが、最近、こういうことではないのかと思うようになった。つまり、職業的研究者は研究が完成しては困るのである。研究が画期的であればあるほど、周辺も含めて従前の努力を無にすることが多い「破壊的創造」になる。こうなると従前のテーマは終わり、食っていくためには別のテーマに乗り換えなくてはならず、そのためにはかなりの努力を要求される。職業的研究者の待遇はかつてより悪化し、期限付き雇用が多くなっているようである。テーマが完成したら期限の延長はないかもしれない。だから同じテーマをなるべく長く引っ張りたいという気持ちも、わからなくはないのだが、それでは国家的損失である。こういう職業的研究者の一種サボタージュを破壊するのは非職業的研究者であろう。当然、職業的研究者の反発を招く。

本書の内容も少なからず反発を被ったものばかりである。国内では **Giordano Bruno** のように焚書に処せられる運命にあるかもしれない。それを見越して海外で生き延びようという英文版も作っており、そう遠くはない将来、いずれわが国に必要となったとき逆輸入される可能性、いわば黒船作戦の余地を残しておきたいと思い、引退した現在、自分のサイトで公開しているのである。

しかしながら、3.11 の福島第一原発事故や JR 福知山線脱線事故の影響は大きい。組織が営利のために行った活動で災害を引き起こしても、誰も処罰されない社会なのだ。もし組織活動が原因となって災害が生じたとき必ず刑事罰が課されるのであれば、それは一種の抑止力として機能するのであるが、今はそれさえないのだ。この状況で国民多数が原子力の再稼働に賛同するとは、電気事業に身を置いた著者でさえ、とても思えないのである。国民多数の賛意を得るためには、例えば「組織災害処罰法」のような刑法を作って、災害時には責任者に必ず刑事罰を科すことを明記して抑止力にすることが必要でないか。3.11 だって、等しく津波に襲われた東通、女川、福島第二、東海第二は、様々な対策を講じていたことが幸いして、災害を免れている。独り福島第一の 1～4 号機だけが災厄に遭遇したことには、必ず理由があるはずなのだ。国も電力業界も、そこを明確にせず、どの原発も等し並みに扱うから、国民はあらゆる原発全般を等し並みに拒否するのである。ここは福島第一に固有の罪を明確にすることが必要と著者は思う。それを「組織災害処罰法」の精神は問うているのである。

本書は **Cassandra** の予言である。予言は当たることと信じられることという 2 条件が成立しなければ機能しない。**Cassandra** の予言には後者が欠けている。かくて **Troy** は敗れ、廃墟になってしまった。でも、**Cassandra** の予言は当たったのである。**Troy** 以外では信じられるかもしれないし、廃墟になった **Troy** だって、いつの日か **Schliemann** が発掘してくれるかもしれない。この **Cassandra** の予言は、既に米国を先頭に、世界各国で同様なものが現れつつある。現在のわが国の電気事業・電力工学のトップがいかに無能であっても、欧米の趨勢がいずれ電力系統工学の世界標準になっていくであろう。そのときわが国の、職業的学者・研究者ではない職人の名誉のために、焚書の憂き目にあってしまったが、あるいは埋もれてしまっているが、過去にこのような研究が行われていたのだという証拠を残しておきたい、というのが著者のささやかな願望である。

2017 年 7 月
無名の電気技師
駒見慎太郎

