

平成 27 年 10 月 26 日

技術ロードマップ「エネルギー機器の安全・信頼性・効率向上」の改訂について

材料力学部門  
技術ロードマップ委員会

## 1. はじめに

技術ロードマップは、産業界からはニーズを提示する場として、学术界からはシーズの応用先や研究の方向性を探るための情報源として、それぞれ活用いただくことで両者のマッチングを図る有用なツールです。材料力学部門で近年問題認識されています産業界と学术界の距離を縮めるためにも、貢献できる可能性を有するものです。

このため、材料力学部門が 2007 年度に作成した技術ロードマップ「エネルギー機器の効率・出力向上」を最近の状況を踏まえて見直し、改訂案を作成しました。また新たに、産業界の視点「ニーズ（エネルギー機器とその要求）」と学术界の視点「シーズ（研究のアプローチ）」をそれぞれ抽出し、両者の対応表を作成しました。これらは、材料力学部門の活動を網羅したものではありませんが、産学で議論を行える典型例として取り上げさせていただきます。今後、領域を広げていく可能性はあります。部門登録者の皆様のご意見をお聞きし、必要な修正を加えたいと考えていますのでどうぞご協力よろしく願いいたします。（ご意見がございましたら、12月末日までに [mmd@jsme.or.jp](mailto:mmd@jsme.or.jp) に連絡いただければ幸いです。）

## 2. 日本機械学会における技術ロードマップの位置付け

2007 年の日本機械学会創立 110 周年事業の一環として、技術ロードマップ作成が行われています (<http://www.jsme.or.jp/InnovationCenter/images/roadmap2007.pdf>)。

主旨を抜粋すると以下の通りです。

日本機械学会には、機械に関わる“技術”と“学術”に責任を持つ専門家集団として、その時代的役割を的確に捉え、真に社会に貢献する行動が求められております。機械技術に対する社会の信頼と負託を得て、社会の要請に応え、社会を先導する役割を果たすため、創立 110 周年を迎えるにあたり本会では、独自の視点に立った JSME 技術ロードマップの作成を行うことと致しました。

技術ロードマップの作成には社会のニーズ把握、法規制の動向、技術の原理・メカニズムとその限界の把握、経済性、産業規模、消費者の動向などを総合的に判断する必要があり、現在まで、定量的な議論にまで到達することがなかなか出来ない分野でした。そこで、世界を先導する機械学会として、会員の要望に応え、技術ロードマップの作成にチャレンジし、機械に関連する技術予測を提供し、機械技術者および機械関連企業の研究開発、技術開発、

競争力強化の参考に寄与すると共に、日本の技術が世界をリードするべく貢献し、併せて、日本機械学会の社会的存在感を高めることを目指して活動してきました。

これら社会的、学問的、産業的、国家的な貢献が期待される JSME 技術ロードマップの構築を日本機械学会の恒常的な活動とするため、2006 年 11 月には産官学連携センターに技術ロードマップ委員会が設置され、バイオエンジニアリング、材料力学、機械材料・材料加工、エンジンシステム、熱工学、機械力学・計測制御、ロボティクス・メカトロニクス、環境工学、計算力学、情報・知能・精密機器、交通・物流、設計工学・システム、技術と社会、流体工学、の各部門が協力しました。

JSME 技術ロードマップの作成に当っては、基本的な考え方として、次の点が留意されました。

- ・課題の選定は技術的・産業的視点で行い、内容の検討は学術的視点で行う。
- ・作成上での見解の相違は、無理に統一せず異論を併記する。
- ・予測される環境変化や、必要とされるブレークスルーなども併記・付記する。
- ・利用者は、当該分野の技術者や研究者だけでなく、政策立案企画、経営判断、産業技術開発の企画、マスコミ、教育関係者など、直接の専門家でない人達も想定する。
- ・定期的に見直しを行い、最新状況を組み入れた継続型にする。

### 3. 材料力学部門のこれまでの取組み（2007 年度）

材料力学部門では、上記の機械学会全体の動きと連携し、材料力学部門に所属する研究者・技術者にとって最も重要な課題の一つである「エネルギー機器の効率/出力向上」を代表テーマとして選定し、技術ロードマップを作成しました。

#### ①趣旨

材料力学は、基盤技術として機械工学のあらゆる領域に適用されます。そして、機械製品の複雑化、大型化、超小型化と使用条件の過酷化に対応して、実際の構造を実現するための設計・製作・保守・運用に係わる評価技術を提供することが求められています。特に社会インフラを支える機械の事故や、複雑な機器の構成要素のトラブルは社会的・経済的に大きな損失をもたらします。

従って、材料力学に期待される現代的要請として次の項目をあげることができます。

- (1) 既存の機械設備を評価して交換・補修などの指針を的確に示すこと。
- (2) エネルギー問題解決のための材料・構造の革新を支える指針を示すこと。
- (3) 機械設備・機器の安全・安心を確保するための評価と対策を示すこと。
- (4) 安全・安心(信頼性)と低コストを両立させる判断手法を示すこと。

以上を実現するための機能(手法)を分析し、対応する要素技術を抽出してロードマップを作成することとしました。材料力学の対象は多岐にわたっていることから、ここではエネルギー機器の効率/出力向上を実現するために必要な材料力学分野のロードマップを例とし

て示しました。

#### ②技術課題に対する社会的・技術的ニーズ

- ・火力発電所の高温化・高圧力化による効率向上と信頼性向上によるメンテナンスコスト抑制。
- ・原子力発電所の高出力化と信頼性の確保。
- ・エネルギー多様化に適応した発電システムの実現。

#### ③キーパラメータ解説

・発電効率を高めるためのパラメータは、火力機器では流体温度／圧力であり、原子力では出力です。これらを実際の機器として実現するための手段が材料力学であり、各機器の実用化段階に合わせて適用される評価技術が確立されています。今後ともこのトレンドには変化はなく、高温化によって新たに導入される材料と劣化・損傷現象に対し、構造強度評価技術の開発が同期して行われます。

#### ④キーパラメータの高度化を実現するメカニズムの可能性

- ・耐熱材料の構造強度評価技術の開発により、汽力発電プラントの蒸気温度・圧力を向上させた設計を可能にする。
- ・耐熱材料と冷却技術を組み合わせた部材の構造強度評価技術の開発により、コンバインドサイクル発電プラントのガスタービン燃焼ガス温度を向上させる。
- ・環境・構造強度評価技術の開発により、原子力プラントの信頼性を確保して出力を向上させる。

#### ⑤将来の社会に関する展望

- ・化石燃料供給が不安定化し、大幅な価格と量の変動が起きると予想されることから、燃料多様化に対応した高効率機器の開発を強度設計技術により実現する。
- ・既存設備の有効活用を実現する保全・再生技術の開発により、資源の希少化と価格変動に強いエネルギー機器産業構造を確立する。

### 4. 材料力学部門における技術ロードマップ改訂の目的（2015年度）

2007年に作成した「エネルギー機器の効率/出力向上」は、制定から7年が経過し、定期的な見直しの時期となりました。この間、社会では「効率」に加え「安全」や「安心」がより強く求められるようになりました。また、2011年3月に発生した東日本大震災と福島原子力発電所事故により、その傾向がさらに強くなったと考えられます。これにより、「エネルギー機器」に対しても「安全と信頼性」の向上がより重要な課題となってきました。これを受けて、2014年度に材料力学部門内に技術ロードマップ委員会（注）を設置し、表題「エネルギー機器の安全・信頼性・効率向上」と改め内容の見直しを含む改訂を行いました。{(注) 2014年度委員長 猪狩敏秀（三菱重工）、2015年度委員長 笠原直人（東大）、泉聡志（東大）、高木愛夫（東電）、釜谷昌幸（原子力安全システム研究所）、藤山一成（名

城大), 岡崎正和\* (長岡技科大), 吉村忍\* (東大), 野中勇\* (東北大), 林眞琴\* (茨城県), 川上崇\* (富山県立大), \*アドバイザー}

## 5. 改訂版の説明

エネルギー機器の安全・信頼性・効率向上に寄与する, 産業界の技術課題と材料力学分野の学術研究を再点検し, 下記の手順で技術ロードマップの作成を行いました.

(1) 産業界の視点から「ニーズ (エネルギー機器とその要求)」を, 学術界の視点から「シーズ (研究のアプローチ)」をそれぞれ選定しました.

「ニーズ (エネルギー機器とその要求)」としては, 超高温・超高压・環境劣化などの条件で使用される代表的機器として, 火力発電機器 (汽力発電), 火力発電機器 (ガスタービンおよびコンバインドサイクル), 原子力, 燃料電池 (SOFC), およびエンジン (ロケットエンジンなど) を選定しました. これらの機器への要求として, 近年の社会情勢を勘案して, 安全, 信頼性, 効率向上を挙げました. また, 再生可能エネルギーや水素エネルギーの大量導入時期には, 組織やエネルギーの種類を超えた大規模なグリッドの管理, 自然現象など様々な荷重への対応が必要とされます. 上記のエネルギー機器に対しても, 人・組織・人工物を含むトータルマネジメントシステム技術が必要になると想定されます.

一方, 「シーズ (研究アプローチ)」の項目としては, マルチスケール解析, マルチフィジックス解析, 情報科学, 寿命・余寿命評価, ライフサイクル管理などを選定しました. これらは, 材料力学の基盤である, 弾塑性力学, 高温強度, 疲労, 破壊力学, 信頼性工学あるいは FEM などの要素技術の上に新しい切り口として定義したものです (スライド 1). 現時点においては, 既存のロードマップの延長上で項目を選定しています. ここでは取り上げませんでしたが, 今後は再生可能エネルギーや水素エネルギーについても, 同様の整理が必要と考えられます.

(2) 「ニーズ (エネルギー機器とその要求)」と「シーズ (研究アプローチ)」の関連を表にまとめました. これは, 「エネルギー機器とその要求」において, 各機器特有の技術キーワードを抽出し, 研究アプローチの各項目との対応を一覧表としてまとめたものです (スライド 2).

(3) 「ニーズ (エネルギー機器とその要求)」と「シーズ (研究アプローチ)」の対応を表にまとめた (2) を詳細化し, (2) の技術キーワードを可能な限り材料力学分野の学術用語で表現してみました. 材料力学研究者が研究テーマと具体的にニーズの関係を理解し易いようにまとめ直したものです (スライド 3).

(4) 以上の背景を基に、「汽力発電プラントのロードマップ」および「高効率コンバインドサイクル発電プラントのロードマップ」を作成しました（スライド4およびスライド5）。

「汽力発電プラントのロードマップ」は、2007年度版をベースに総合資源エネルギー調査会エネルギー関係技術開発ロードマップ

([http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic\\_policy\\_subcommittee/015/pdf/015\\_009.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/015/pdf/015_009.pdf))などを参考に、700℃級先進的超々臨界圧発電（A-USC）の導入目標時期を追加するとともに、研究アプローチの視点として追加されたマルチスケール解析、寿命評価、ライフサイクル（LC）管理などのキーワードを加筆して修正しました。

また「高効率コンバインドサイクル発電プラント」についても、同様に総合資源エネルギー調査会エネルギー関係技術開発ロードマップなどを参考に1600℃級、1700℃級の実用化目標を追記するとともに、石炭ガス化複合発電（IGCC）、石炭ガス化燃料電池複合発電（IGFC）などを追加し、マルチスケール解析など新たに研究視点として追加されたキーワードを加筆して修正しました。

(5) 今回新たに「マルチスケール解析」および「マルチフィジックス解析」について、技術動向を示すロードマップを作成しました（スライド6およびスライド7）。

マルチスケール解析は、ナノスケール（原子・電子）からマクロスケール（欠陥、結晶組織、試験体）までを、カバーする解析技術です。電子状態計算、分子動力学、欠陥（転位）動力学、結晶塑性有限要素法、フェーズフィールド法など様々なスケールごとの解析手法と、EBSDやTEM、Atom-probeなどの観察技術が組み合わされた技術が開発されており、材料強度のメカニズム解明を目指しています。

それぞれの解析手法は、間接・直接的に統合され、階層を超えて知見が伝えられることにより、高度化していくと考えられます。将来的には、マルチフィジックス解析とも統合され、CAEの一端を担うと考えられます。

マルチフィジックス解析は、構造・熱・流体・機構の様々な力学を連成させる解析手法です。古くから、熱—構造解析、流体—構造解析などの連成解析が行われてきましたが、最近では、これらすべてをシームレスにつなぐという意味で、マルチフィジックス解析と呼ばれ、エネルギープラントや自動車をまるごと解析してしまおうという試みが行われています。さらに、力学解析と制御を統合させ、物理モデルに基づいた制御技術も期待されています。また、機械工学分野では、これまで難しかった製造プロセス（溶接、溶射、焼結、加工）の解析も盛んに行われるようになり、製造プロセス／使用履歴を反映した強度解析が期待されています。将来的には、マルチスケール解析の知見を取り入れ、さらなる高度化をしていくと考えられます。

(6)「情報学応用材料強度技術」について新たにロードマップを作成しました(スライド8).

エネルギー機器の安全・信頼性・効率向上のための技術において、すでに国際的なリーディングカンパニーは世界的な機器モニタリングネットワークを駆使してビジネスの拡大を進めています。一方、我が国では、きめ細かい点検・保守が行われていますが、必ずしもビジネスに生かす情報資源として有効活用されているとはいえません。

そこで、本ロードマップでは、まず、既存データの掘起こしと処理に関して、医療やマーケティングの分野で威力を発揮している多変量解析技術の応用を最初のステップとしてとりあげています。その次に、不完全データも生かせるようなデータ同化手法を活用し、事象のトレンドを推定するための定性データも含めた最適なパラメータを見出していきます。さらに、事象間の因果関係を分析し、高度な予測モデルを組立てていきます。また、ヒューマンインタラクティブな操作環境の高度化や、最終的には人の手を介さない自律化した高度統合情報システム化により、暗黙知や経験知までを含めた的確な予測ときめ細かい判断を可能とするシステムが実用化されて、エネルギーネットワークの効率化とエネルギーミニマム化が実現されると考えられます。

(7)「寿命・余寿命評価」および「ライフサイクル管理」について新たにロードマップを作成しました(スライド9およびスライド10)。

「寿命・余寿命評価」はエネルギー機器を安全にかつ効率的に運用するために重要な技術です。ロードマップの作成にあたっては、現在も盛んに研究が行われ今後実用化への展開が期待されているヘルスマモニタリングや非破壊検査などの監視・検査技術、限界状態評価やリスクベースメンテナンスなどの先進的な評価技術、マルチスケールシミュレーション、マルチフィジックスシミュレーションなどの予測技術などのハードとソフトについて網羅しました。さらにこれらの技術の進展に加えて、データベースあるいはICTなど情報科学技術の応用による予測・監視技術の高度化、材料力学の知見の材料開発への展開と開発材料の適用による一層の信頼性、性能の向上につながる総合最適設計へのステップアップが期待されています。

ライフサイクル管理では、製造、供用開始から、運用、保全、さらには廃棄や再生などの広範囲の取り組みをカバーしながら、安全・信頼性・性能向上を実現していく必要があります。そこで、ライフサイクル管理の最適化に向けて、信頼性評価技術、寿命・劣化予測技術などのソフトウェアの対応と、保全、検査、再生技術などに代表されるハードウェアの開発課題を網羅しました。また、コストパフォーマンスと信頼性確保を両立するためには、バランスがとれ、かつ戦略的な取り組みが要求されます。それを実現するためのリスクベースの活用

と、その基礎となるデータベースの構築も課題として含めました。

(8)「原子力の安全・信頼性」について新たにロードマップを作成しました(スライド11)。

従来は事故を起こさないための設計が機械技術者の活動の主目的であったと考えられますが、福島原子力発電所事故を経験したことから、事故が起こることを前提とし、減災やレジリエンスを考慮した設計と・対策が世の中と規制側から求められるようになりました。このため、設計・メンテナンス・緊急時対応などの役割分担を合理的に決めるためのリスクベース工学や、リアリスティックな強度をメカニズムに基づき予測するための材料科学技術の活用がこれまで以上に必要とされています。また、実験が難しい事故時のシナリオ検討等にはマルチフィジックスシミュレーション技術の応用が期待されています。将来的には、上記の技術が組み合わさることによって、プラントの設計から廃炉までのトータルのライフサイクルマネジメントを合理的に行うための技術を確立することが望まれています。

以上