

解説 記事

システム化規格の概念と展開

日本原子力研究開発機構

浅山 泰 Tai Asayama,
森下 正樹 Masaki Morishita

1. 緒言

システム化規格 (System Based Code, SBC) は、構造物に適用される複数の規格基準に含まれる技術項目の間で余裕を相互交換可能にすることにより、余裕の重複を避け、構造物の余裕を適正な水準に合理的に設定することを目標とする、柔軟な規格基準体系として我国で発案された⁽¹⁾⁽³⁾。発電用原子力設備の構造物には、一般に、材料規格、設計規格、溶接規格、維持規格等が適用されるが、規格の規定にはいずれも固有の余裕が含まれるため、すべての規格が適用される構造物は、結果として過剰な余裕を持つ傾向となる一方、全体としての余裕が定量的に明らかではないことから、相対的に十分な余裕を得られない部分が生じる懸念を完全に払拭することが難しいのも現実である。

システム化規格概念は、このような課題を解決し、より合理的な考え方で構造物の信頼性を確保するために構造規格体系が備えるべき要件として提案された。その具体的な特徴は以下の3点に整理することができる。

- 1) 目標信頼性を満たすように設計および維持が行われること
- 2) 材料、設計、製作、検査、保守等の技術分野間の「裕度交換」が可能であること
- 3) 現状の規格基準に採用されていない新技術をタイムリーかつフレキシブルに採用可能であること

これらの特徴を、現状の規格体系との対比の形で図-1に示す。システム化規格のもつこれらの特徴によって、規格体系の持つ工学的合理性が大きく向上し、結果としてさまざまなメリットが生じるが、そのいくつかを以下に例示する。

第1の特徴によって、対象となる構造物の信頼性が明らかになり、余裕が過剰になることや逆に不足することが避けられる。安全評価とリンクさせれば、プラントの安全性目標と整合する形で構造信頼性の目標を

設定できることになり、プラントのリスク評価と適合した構造設計が可能になる。これは、原子力プラントの安全性評価の高精度化に対する要求がますます高まる状況において、今後の構造設計方針が志向すべき大きな方向性であると考えられる。

第2の特徴である「裕度交換」は、例えば、より高強度の材料や施工法を採用した場合には、通常の供用期間中検査の頻度を変更し、高い信頼性を維持したまま新技術採用のメリットを顕在化させることなどが相当する。これにより、プラントの特徴を構造規格の立場から最大限に引き出すことが可能になり、炉型や部位に応じた多様な考え方に基づく設計や維持を実現することに大きく貢献できる。

第3の特徴である新技術のタイムリーかつフレキシブルな採用は、第1の特徴および第2の特徴を活用することにより実現される。すなわち、システム化規格概念においては、最終的な設計成立性が、目標信頼性への適合性により判断されるので、これに基づき新技術の採用可否を容易に判定可能である。例えば、有望な高強度材料についてデータが既存材料ほど取得されていない場合に、当該材料の採用当初にはばらつきを大きく見積もり (設計係数を大きくとり)、その後供用中に材料試験データベースや評価法が充実するとともにその見積もりを現実的に修正し (設計係数を改訂し)、

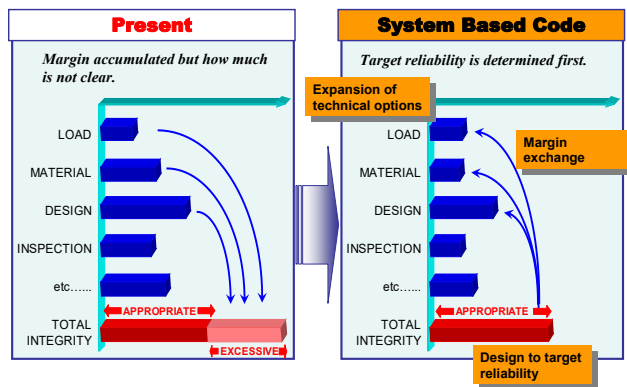


図-1 システム化規格の概念

維持段階で当該材料採用のメリットを顕在化させてゆく方法などが考えられる。これにより、材料開発と規格化に要する時間を合理的に短縮できる可能性がある。

システム化規格の3つの特徴は、以上の例に示されるように、すべて工学的合理性に則したものであり、既存の規格においてもそこそこに取り入れられていると考えられる。しかしながら、それぞれ独自の技術的背景や歴史的経緯に沿って策定されてきた規格は、相互に連携する仕組みを顕在化する形にはなっていないため、システム化規格概念を取り入れることにより、よりフレキシブルな体系を実現してゆく必要がある。

システム化規格概念の特徴は、すべてが取り入れられた場合に最大限の効果を発揮するが、段階的にも採用可能であり、その場合でも十分にメリットを享受することができると思われる。

本稿では、システム化規格概念について、上記の3つの特徴に即してその内容を具体的に検討した上で、米国機械学会 (ASME) および日本機械学会 (JSME) における規格化活動の状況について紹介する。

2. システム化規格とは

システム化規格の定義および3つの特徴は緒言で述べた通りなので、本章では、3つの特徴のそれぞれについて具体的に内容を検討し、最後に、構造信頼性 (破損確率) の取り扱いについて述べる。

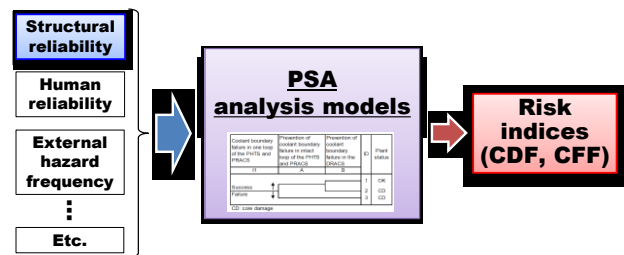
2.1 目標信頼性に適合した設計と維持

システム化規格の第1の特徴は、目標信頼性を満たすように設計および維持が行われること、すなわち、構造物は供用期間を通じて目標信頼性を満たすように要求されることである。そこで、目標信頼性をどのように設定するか、設定された目標信頼性に適合するように構造設計や維持を行うためにはどのようにすればよいかを具体的に考える。

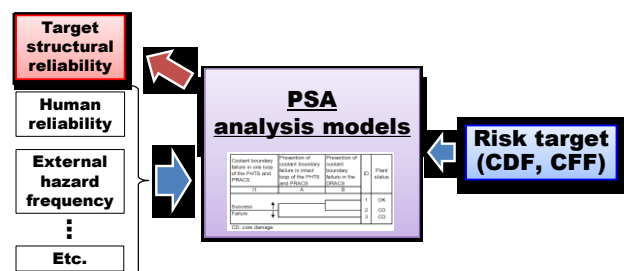
構造物に信頼性設計を適用する場合、その目標信頼性を決める方法として、既存の相当の構造物の信頼性を評価してそれと同等になるように定める方法等がある。しかしながら、原子力プラントにおいては、安全評価の高精度化がますます要求されるようになり、リスクを指標とした評価の重要性が増してゆくことを考えると、安全評価と連携する形で構造物の目標信頼性を定めることが志向すべき方向と考えられる。

この場合、構造物の目標信頼性は、確率論的リスク評価 (Probabilistic Risk Analysis, PRA) と連携して定めることができる。プラントに対して炉心損傷頻度

(CDF) や格納容器損傷頻度 (CFF) の制限値等が定められるときに、これを満たすように、原子炉容器や配管等の静的機器の構造信頼性の目標値を割り振るわけである。これは、PRA を通常の「順方向」ではなく「逆方向」で用いることに相当する。この概念を図-2に示す。高速炉の原子炉容器を念頭に置いて、この方法により構造信頼性の目標値を定量的に設定するための検討が行われており、その成立性がすでに示されている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。



(i) 通常の PRA の適用方法



(ii) システム化規格における PRA の適用方法

図-2 PRA を用いた信頼性目標の導出⁽⁴⁾⁽⁵⁾

構造物の目標信頼性が定められた場合に、それに適合する設計を行うにあたっては、基本的に既存の設計規格の評価式をそのまま用いることができる。そのうえで、構造信頼性を評価する手法が必要となるが、具体的な手法としては、荷重・耐力係数設計法 (LRFD 法) やモンテカルロ法等があげられる。実際に用いる手法は、どの程度の定量的評価を志向するかに応じて選択すればよい。

LRFD 法は、荷重と強度のばらつきを考慮したうえで、構造物の目標信頼性に適合した形で荷重と強度のそれぞれについて設計係数を簡便に定めること特徴とする手法であり、基礎理論はすでに確立されている。特に海外においては、土木・建築等の分野で規格にすでに採用されその合理化効果が広く認識されている。LRFD 法の概念を従来の許容応力法と対比する形で図-3に示す。LRFD 法では、結果として設計規格に記載される評価式や設計上の手続きは既存の方法と大き

な差がなく、実務的にすぐに採用できるというメリットがある。モンテカルロ法はより一般的な手法で、計算機プログラムを利用する必要があるが、近年米国等で原子力プラントを対象とした確率論的破壊力学のコードなどが実用化されていることを考えると、技術的にはすでに成熟段階に達していると考えられ、今後その適用範囲と重要性はさらに大きくなると考えられる。

維持についても設計の場合と同様に考えることができるが、設計と維持を統合して考える場合については次節で述べる。

<許容応力法>
安全係数は経験に基づき強度について定められる。

$$\sum_{i=1}^k S_{mi} \leq \frac{R_n}{S_F}$$

S_{mi} : 公称応力 (k 種類の公称応力を考慮)
 R_n : 公称強度
 S_F : 安全係数

<LRFD法>
部分安全係数は信頼性理論をもとに荷重のそれぞれと強度について定められる。

$$\sum_{i=1}^k \gamma_i S_{mi} \leq \phi R_n$$

ϕ : 強度係数
 γ_i : 荷重係数 (k 種類の荷重係数が定められる)

図 - 3 荷重・耐力係数設計法 (LRFD 法) の概念

2.2 「裕度交換」

システム化規格の第2の特徴である「裕度交換」は、たとえば設計規格のようなひとつの規格内で行う場合と、より広く複数の規格間で、例えば設計規格と維持規格の間で行う場合を考えることができる。システム化規格概念を適用することでより大きな効果が得られるのは後者である。

このような例として、緒言でも取り上げたものがあるが、より高強度の材料や施工法を採用した場合には通常の供用期間中検査の頻度を変更し、高い信頼性を維持したまま新技術採用のメリットを顕在化させることなどがあげられる。これにより、プラントの特徴を構造規格の立場から最大限に引き出すことが可能になり、炉型や部位に応じた多様な考え方に基づく設計や維持を実現することに大きく貢献できる。

設計と維持の「裕度交換」を実現するためには、供用時に生じ得る経年変化現象を設計段階で予め把握したうえで信頼性を評価して目標値への適合性を判断することが必要となる。このような判断は、運転経験の蓄積や技術開発等の成果を活かすことにより、現状においても工学的に十分可能である。

破損モードによっては、確率論的破壊力学等を活用して、信頼性評価と直接リンクする形で詳細に評価することも可能である。一例をあげると、図-4は高温と低温のナトリウムを交互に流すことにより熱疲労き裂を発生させた実験結果であるが、これに対して、確率論的破壊力学を活用することにより、発生したき裂の深さの密度分布を精度よく求めることができることが示されている⁽⁶⁾。これは、熱疲労の場合破損確率がき裂深さの確率密度分布をもとに求められることを考えると、破損確率の評価値そのものが現象に則した物理的な意味を持つものであること示していると言える。

このような手法を用いることにより、構造信頼性を物理的な裏付けを持つ形で求めることが可能になることから、これを技術的根拠として、供用期間中検査計画をより合理的に立案する道筋が開ける。図-5は、高速炉の原子炉容器を想定して、破損確率の経時変化を供用期間中検査の頻度に依存する形で評価した例である。このような評価をよりどころとして、供用期間中検査の要求を設計に適合した形でフレキシブルに定めることが可能になる⁽⁷⁾。

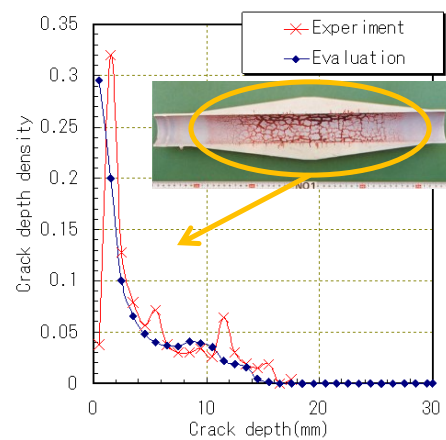


図-4 熱疲労き裂の深さの確率密度分布の評価例⁽⁶⁾

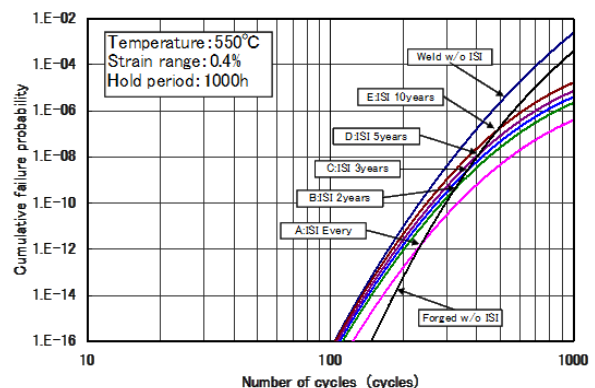


図 - 5 破損確率の経時変化の評価例⁽⁷⁾

2.3 新知見のタイムリーでフレキシブルな導入

発電用原子力設備の構造規格の高度化は従来から不断に行われている。個別の規定の高度化はもとより、当初は設計規格だけであったものが、運転経験の蓄積や破壊力学の進歩などを背景として維持規格が策定されるようになるなど、規格体系自体も進化を遂げている。しかしながら、構造物の信頼性に直接係わる設計係数や供用期間中検査の要求など、一度規定されたものは、その後運転経験の蓄積や技術開発による新たな知見があったとしても、改訂することには極めて大きな労力と長い時間を要するのが現実である。

システム化規格では、第1の特徴のもと、第2、第3の特徴を活用することにより、目標信頼性に適合する形で設計および維持を行う限り、具体的な技術的選択肢の選定に関しては設計者が大きな自由度を持つことが可能になる。これにより、新たな知見の導入も、従来にも増してタイムリーに行うことができると考えられる。

例えば、緒言でも取り上げたように、有望な高強度材料についてデータが既存材料ほど取得されていない場合に、当該材料の採用当初にはばらつきを大きく見積もり（設計係数を大きくとり）、その後供用中に材料試験データベースや評価法が充実するとともにその見積もりを現実的に修正し（設計係数を改訂し）当該材料採用のメリットを顕在化させてゆく方法などが考えられる。これにより、材料開発と規格化に要する時間を合理的に短縮できる可能性がある。

さらに、より大きな枠組みで設計と維持が連携に関する例として、設計段階で破断前漏えい（Leak Before Break）の成立性を示すことなどにより、供用期間中に一定の大きさ以上の破損を想定する必要がないことを示せるのであれば、このことを前提として、供用期間中検査計画において、試験程度や試験頻度を必ずしも予め画一的に設定されたものとして考えずに、当該構造において想定すべき破損の大きさに適合する形でフレキシブルに設定することがあげられる。このような考え方も、プラントに固有の特徴を構造規格の立場から最大限に引き出し、技術的合理性をもつ設計や運用を実現する合理的なものである。

2.4 実際の適用に当たって

これまで検討してきたように、システム化規格の3つの特徴は、すべて工学的合理性に則ったものであり、その考え方は、既存の規格においてもそこそこに取り入れられていると考えられる。また、今後その特徴を

フルに適用するにあたって必要な技術は、構造信頼性評価技術に見られるように、十分成熟していると考えられ、システム化規格概念を実際に適用するための環境は現状においてすでに整備されていると言える。

一方、システム化規格では、目標信頼性に適合する設計および維持を行うため、従来に比べ、構造信頼性（破損確率）を明示的に取り扱う場合が増えることが予想される。構造信頼性（破損確率）による評価は、決定論的な意思決定の背後にあるばらつきの概念（情報）を陽な形で加味するものであり、決定論と矛盾するものでもなく、より多くの情報に基づく意思決定を志向するという意味で積極的に採用してゆくべきものである。ただし、その適用に当たっては、以下の点を考慮することが有用であると考えられる。

まず、安全評価と構造設計との連携という観点では、PRAにおける機器の機能喪失状態と、構造信頼性における破損の対応あるいは論理的関係を明確にしておくことが必要である。次に、構造信頼性（破損確率）の評価値は、多くの場合、決定論で用いる既存規格の評価式に荷重や強度の標本から得られたばらつきの情報を加味して求められた指標と考えるべきものであり、必ずしも「真の信頼性（破損確率）」ではない。そこで、その評価手順および入力条件は専門家のコンセンサスを得た形で標準化しておくことが望ましい。最後に、信頼性（破損確率）の評価を高精度化するための情報は、プラントの建設終了後や供用開始後に新たに得られることが多いため、新たな情報を用いて随時評価をアップデートしてゆく仕組みが必要である。

3. 規格化活動の状況

システム化規格概念の有用性は広く認識され、すでに、米国機械学会および日本機械学会において、規格化に向けた活動が鋭意行われているので紹介する。

3.1 米国機械学会（ASME）

システム化規格概念は我国から発信されたアイデアであり、個別規定の技術的改訂を超えた規格体系全体に関するユニバーサルなフレームワークを提案するものである。ASMEはシステム化規格概念の独自性と有用性にいち早く着目し、従来から進めてきたリスク評価を活用した規格の改訂等の個別技術による高度化とタイアップさせる形で、規格体系全体を抜本的に高度化させるために、ASMEが注力するリスク技術に関する長期計画であるRisk Management Strategic Planの中に組み込んでいる。具体的には、Section IIIおよび

Section XI にリスク技術を適用し、さらに Operation and Maintenance 等も統合して構築される規格体系が行き着くべきゴールとして位置付けられている⁽⁸⁾。以下、ここに至る背景と、ASME における規格化活動の現状について述べる。

ASME では、従来から、軽水炉を対象としてリスク評価に基づく供用期間中検査プログラム (Risk Informed Inservice Inspection, RI-ISI) を開発し、ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section XI Division 1 (軽水炉の供用期間中検査基準) に導入している実績がある。さらに、最近では、高温ガス炉について、Reliability Integrity Management (RIM) Program を開発し、Section XI Division 2 (ガス炉の供用期間中検査基準) で規格化すべく審議中である。これは、基本的な考え方は RI-ISI を踏襲しながら、高温ガス炉の特徴により適合する形での供用期間中検査要求を定める方法を確立することを趣旨としている。同時に、本概念を新型炉を含む高温ガス炉以外の炉型にも適用する動きもある。並行して、PRA 手法の標準化にも力を入れており、既に開発済みの軽水炉向け PRA 基準に加えて、軽水炉以外の炉型へ適用するための PRA 基準の開発も進め、これらをリスク評価に基づく規格類のベースとする計画である。

また、Boiler and Pressure Vessel Code Section III (原子力設計基準) に、確率論的手法を導入することにより高度化するための検討も行われている。Class 2/3 配管の設計に LRFD 法を導入するためのプロジェクトが進行中で、コードケースの開発が進められる計画である。

このように、ASME では、既存炉および新型炉を対象としてリスク評価に基づく規格の高度化を積極的に進めているが、それらは個別の検討の積み重ねの色合いが濃く必ずしも一つのコンセプトで統合された形で展開されているわけではない。このような状況で、システム化規格は、個々の高度化努力を包含するより大きなユニバーサルなフレームワークとしての価値が強く認識されており、システム化規格概念自体について活発な検討が行われているに至っている。

原子力規格基準理事会 (Board on Nuclear Codes and Standards, BNCS) は、Boiler and Pressure Vessel Code の高度化の方向性や、国際標準化等に係る意思決定をする組織であるが、この中に、システム化規格を検討する場として、Task Group on System Based Code が設けられ、ASME 規格への反映方法に関する戦略的議論を行っている。その成果は、「フレームワークドキュメント」として取りまとめられ、検討の進捗に応じて随時改訂する努力が行われている。

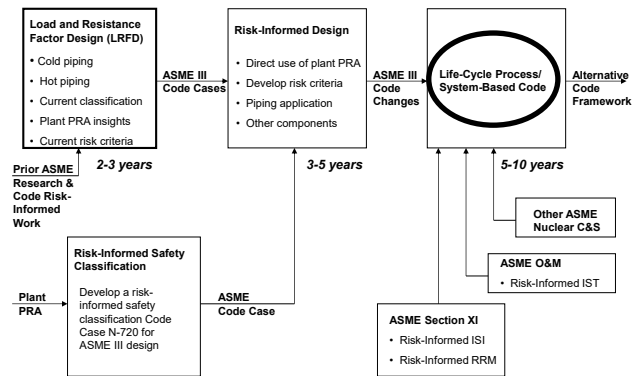


図-6 ASME の規格高度化戦略とシステム化規格の位置づけ⁽⁸⁾

さらに、同 Task Group は、システム化規格に関する啓蒙の趣旨も含めてワークショップを主宰しており、最近では、2012年2月に Houston におけるボイラーおよび圧力容器規格委員会の開催に合わせて開催された。ASME 側から原子力規格基準理事会の委員長等の要人が参加し、システム化規格概念に基づく具体的な評価例や規格化の考え方に関する活発な議論が行われたうえで、同概念に基づき実際に ASME コードケースを策定するための提案が行われた。これにより、ASME では、これまでの技術的検討のフェーズから、実際に規格案を作成するフェーズへ移行することになる。

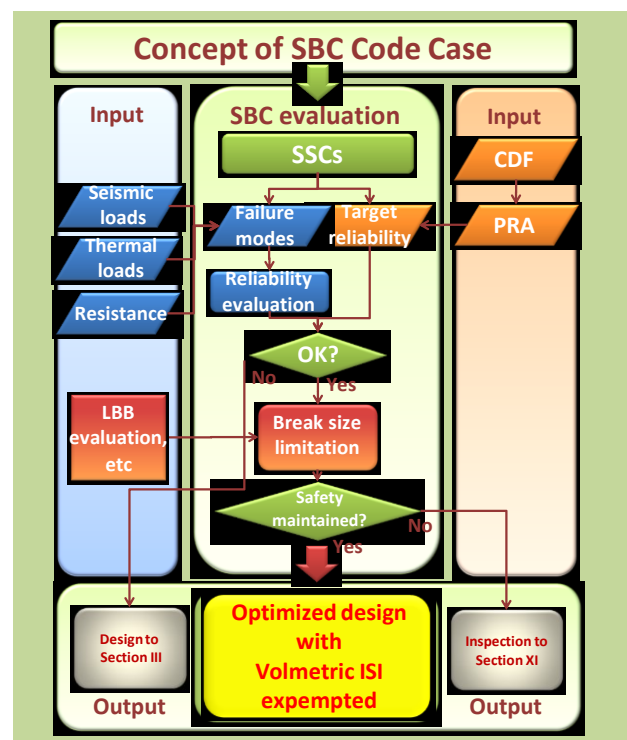


図-7 システム化規格概念に基づくコードケースの基本コンセプト⁽⁹⁾

このように、ASMEはその豊富なリソースを背景に、今後ますますシステム化規格概念に基づく規格化活動を活発化させてゆくことになると思われる⁹⁾

3.2 日本機械学会 (JSME)

JSME 標準化センター発電用設備規格委員会 原子力専門委員会 高温規格分科会 システム化規格検討会では、高速炉の静的機器の構造信頼性の評価手法を定めることを目標として、信頼性評価ガイドラインの策定にむけて努力している。これは、システム化規格概念に基づく規格体系の整備を進める上で、信頼性評価に関する部分のツールを標準化するための作業に先行的に取り組んでいることに相当する。同ガイドラインでは、高速炉において防止すべき主要な破損モードについて、信頼性評価の手法およびその標準的入力条件が具体的に定められる計画である。

JSME ではシステム化規格概念をより広く原子力設備規格に適用するための動きも開始されている。

4. 結言

システム化規格概念は、我国で発案された構造規格体系の抜本的高度化に関するアイデアであり、機器構造物の設計、製作、検査、維持に係る工学的合理性の高い考え方を、諸規格の適用を通じてより自然にかつ効果的に実現できるよう規格体系そのものを高度化してゆくためのユニバーサルなフレームワークである。

システム化規格概念を実現するための技術基盤はそのほとんどがすでに整備されていると考えられ、規格化に向けてより積極的な取り組みが望まれる。

ASME では、システム化規格概念の独自性と有用性にいち早く着目し、リスク評価技術等従来から続けてきた規格高度化の努力とタイアップさせる形でその実現に向けた動きを加速させている。我国としては、今後の規格化活動を力強くリードし、概念の標準化に向けてより一層努力することが期待される。

謝辞

本稿の執筆にあたり、ASME BNCS Task Group on System Based Code (Chair : 湯原哲夫氏)、日本機械学会 発電用設備規格委員会原子力専門委員会高温規格分科会システム化規格検討会 (主査 : 神島吉郎氏) における活動を参考にさせていただきました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Asada, Y., Tashimo, M. and Ueta, M., System Based Code -Principal Concept-, ICONE10 (2002)
- 2) Asada, Y., Tashimo, M. and Ueta, M., System Based Code -Basic Structure-, ICONE10 (2002)
- 3) Asada, Y., Japanese Activities Concerning Nuclear Codes and Standards – Part II, Journal of Pressure Vessel Technology, ASME 128 (2006) 64.
- 4) Kurisaka, K., Nakai, R., Asayama, T and Takaya, S., "Development of System Based Code (1) Reliability Target Derivation of Structures and Components", Journal of Power and Energy Systems, Vol.5, No. 1 (2011) pp.19-32.
- 5) Takaya, S., Okajima, S., Kurisaka, K., Asayama, T., Machida, H. and Kamishima, Y., "Development of System Based Code (2) Application of Reliability Target for Configuration of ISI requirement", Journal of Power and Energy Systems, Vol.5, No. 1 (2011) pp.60-68.
- 6) Asayama, T., Taksho, H. and Kato, T., Probabilistic Prediction of Crack Depth Distributions Observed in Structures Subjected to Thermal Fatigue, ASME Journal of Pressure Vessel Technology, 131 (2009) 011402-1
- 7) Asayama, T., Kawasaki, N., Morishita, N., Shibamoto, H. and Inoue, K., Balancing Material Selection and Inspection Requirements in Structural Design of Fast Breeder Reactors on "System Based Code" Concept, Nuclear Engineering and Design 238 (2008) 417-422
- 8) Handout of the ASME BNCS Workshop on System Based Code, Houston, TX, USA, February 2012
- 9) Asayama, T., Takaya, S. and Morishita, M., Application of the System Based Code concept to the ASME Code for liquid metal reactors, 2012 ASME Pressure Vessels and Piping Conference #PVP2012-78700 (2012)

(平成 24 年 6 月 15 日)