

レジリエンス評価法の高速炉への適用性に関する基礎的検討

Fundamental Study on Applicability of Resilience Evaluation Method to Fast Reactor Plants

東京理科大学	鈴木 正昭	Masaaki SUZUKI	Member
東京大学	出町 和之	Kazuyuki DEMACHI	Member
日本原子力研究開発機構	高屋 茂	Shigeru TAKAYA	Member
日本原子力研究開発機構	近澤 佳隆	Yoshitaka CHIKAZAWA	Member

We have proposed new indices for evaluating resilience, that is, the response margin and response reliability of a nuclear power plant during an accident and detailed procedure for assessing those indices. In this study, the resilience of a simple fast reactor plant model is evaluated according to the indices. The applicability of the resilience evaluation method to fast reactor plants is then discussed from the viewpoints of reflecting the characteristics of each reactor type.

Keywords: Resilience, Response Margin, Response Reliability, Fast Reactor

1. 序論

原子力プラントの合理的で効果的な保全の実現のためには、保全プログラムの基本となる保全重要度を適切に定めることが不可欠である。使用実績の限られる新型炉において安全上重要な機能・設備を判断するにあたっては、より多くのリスク関連情報を活用し、炉型の特徴を適切に考慮する必要がある。

原子力プラントの安全性評価に際しては、リスク評価に加えてレジリエンス[1][2]の観点からの評価を取り入れることが、高い粘り強さを持つ安全の確保のために重要と考えられる。すなわち、どの程度の確からしさで、どの程度の機能的・時間的余裕をもって安全上重要な機能を維持・回復できるのか、また、それら確からしさおよび「対応裕度」がハザード強度の上昇や経年化に対してどのように変化していくのか等を定量的に明らかにし評価することである。著者はこれまでに、設計想定を超える事態に対する原子力プラントの対応能力の指標について、外部ハザード等によって一時的に喪失した安全上重要な機能が、アクシデントマネジメント (AM) 策の実行によって、要求される時間内に最低限必要な機能レベルまで回復する確率および裕度の総体をレジリエンス指標と定義して

評価法を提案している[3][4]。

本研究では、新型炉における安全上重要な設備の判断に資する知見の抽出の観点から、レジリエンス評価法の高速炉への適用性について検討する。ここでは簡易的な高速炉プラントモデルに対してレジリエンス試評価を実施した。

2. レジリエンス指標の評価法

2.1 安全の回復の考え方

外部ハザード等によりシステム安全上重要な機能の一つもしくは複数喪失したシビアアクシデントを考える。システム安全の回復能力の評価について本研究では以下のように考えるものとする (Fig.1) :

- ・ 目標とする安全性能を達成するために最低限必要な安全機能レベル (以後、最低安全機能レベルと呼ぶ) が存在し、また、平常時の安全機能レベルは通常、最低安全機能レベルに対し余裕を有する。したがって、シビアアクシデント発生後、短期的には必ずしも平常時と同様の安全機能レベルまで回復する必要はなく、最低安全機能レベルまで達すれば回復に至ったとみなす。
- ・ ある時間内に最低安全機能レベルまで回復する必要がある。したがって、時間的な制約が存在する。
- ・ AM 策を構成する個々の措置の成否は雰囲気条件等に依存し確率的である。したがって、いずれの AM シーケンス (安全機能回復の進展パス) が生起するかは確率的

連絡先: 鈴木正昭、〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641、
東京理科大学理工学部経営工学科
E-mail: m-suzuki@rs.tus.ac.jp

である。

このとき、システム安全の回復に成功する確率は、回復に至る AM シーケンスの生起確率の積算値 (Fig.1 中の「回復不可領域」を避ける確率) として評価できる。また、対応裕度は、各 AM シーケンスについてその進展曲線と「回復不可領域」との距離から評価できる。さらに、各 AM シーケンスの生起確率と組み合わせて対応裕度の統計量を算出し、プラントレベルの対応能力の信頼性を評価する。

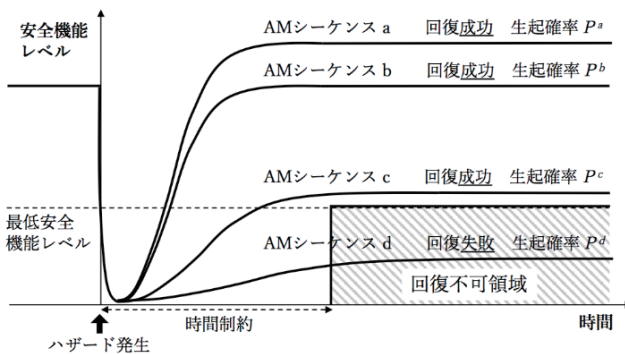


Fig.1 Recovery of safety function

2.2 レジリエンス指標評価手順

レジリエンス指標の評価概略フローは以下のとおりである：

- 1) 事故シナリオの想定
- 2) AM 策の策定
- 3) AM シーケンスの分析
AM イベントツリーの作成
- 4) 各 AM 措置の特徴量の評価
実行失敗確率、所要時間、機能裕度の評価
- 5) レジリエンス指標値評価
各 AM シーケンスの生起確率、累積所要時間、システム機能裕度、時間裕度、回復成否の評価
- 6) 脆弱性の抽出
重要度解析、耐性評価

AM シーケンスの分析 (イベントツリーの作成)

個々の AM 措置をヘディングとした AM イベントツリーを作成し、起こり得るすべての AM シーケンスを同定する。このとき、ある AM 措置 (AM イベントツリーのヘディング) の分岐の判定は、それまでの AM 措置による部分的な機能回復の累積を考慮したうえで為すものとする。

各 AM 措置の特徴量の評価

AM 策中の個々の措置を特徴付ける量として、実行失敗確率、所要時間、機能裕度を考え各々を評価する。この

とき、ハザード強度等の事故時雰囲気条件を考慮する。

実行失敗確率について、各 AM 措置の実行失敗を頂上事象としたフォールトツリーを作成する。フォールトツリーの作成では、外力に起因する構造物・機器の損傷、経年化に起因する構造物・機器の劣化、ランダム故障、人的過誤等を考慮する。

所要時間について、個々の AM 措置 i の実行に要する時間 t^i を評価する。

機能裕度について、個々の AM 措置に期待される機能レベルが、安全の確保上最低限達成すべき機能レベル (最低安全機能レベル) に対してどれだけ余裕を有するかを評価する。各 AM 措置 i に対して、最低安全機能レベルに対する当該措置の機能レベルの比 (すなわち、最低安全機能レベルに対する裕度) を当該措置の機能裕度 m^i として定義する。

レジリエンス指標値評価 (AM シーケンスの定量化、AM 有効性評価)

システム安全の回復に至る AM シーケンスの生起確率の積算値および対応裕度を評価するために、AM イベントツリーおよび各 AM 措置の特徴量を用いて、各 AM シーケンスの生起確率、累積所要時間、システム機能裕度、時間裕度、回復成否を評価する。

各 AM シーケンスの生起確率について、各ヘディング (AM 措置) の分岐確率から、設定したハザード強度 a およびプラント損傷状態 x に対する各 AM シーケンス j の条件付き生起確率 $P^j(a, x)$ を求める。

各 AM シーケンスの累積所要時間について、各 AM 措置の所要時間から、各 AM シーケンス j の累積所要時間 T^j を求める。

各 AM シーケンスのシステム機能裕度について、各 AM 措置の機能裕度から、各 AM シーケンス j についてシステムの機能裕度を求める。直列系を成す AM 策においては、いずれかの措置の機能レベルが最低安全機能レベルを下回った場合 (機能裕度が 1 未満であった場合)、当該 AM 策による回復は失敗 (回復失敗シーケンス) となる。したがって、 i 番目の AM 措置の機能裕度を m^i として、

$$M_F^j = \min(m^i) \quad (1)$$

なる M_F^j をシステム機能裕度として定義して求める。並列系を成す AM 策においては、いずれかの措置の機能レベルが最低安全機能レベルを下回った場合 (機能裕度が 1 未満であった場合) でも当該措置と機能的に冗長な措置が存在することから、システム機能裕度を

$$M_F^j = \sum_i m^i \quad (2)$$

と定義して求める。直並列系を成す AM 策においては、上記直列系および並列系に対する定義を組み合わせることでシステム機能裕度を求めることができる。

各 AM シーケンスの時間裕度について、各 AM シーケンス j に対して、設定した時間制約 T_{Lim} 、および累積所要時間 T^j を用いて

$$M_T^j = T_{Lim}/T^j \quad (3)$$

なる M_T^j を時間裕度として定義して求める。

各 AM シーケンスの回復成否について、時間制約 T_{Lim} 経過時点でのシステム機能裕度 M_F^j が 1 以上となれば（最低安全機能レベル L_{Lim} 達成時点での時間裕度 M_T^j が 1 以上となれば）回復進展パスが「回復不可領域」を通過せず、当該 AM シーケンス j は回復成功であると考えられる。

上記の結果から、想定ハザード強度 a およびプラント損傷状態 x に対する条件付きシステム回復成功率 $P_{Recov}(a, x)$ を次式より求める。

$$P_{Recov}(a, x) = \sum_j P^j(a, x) \quad (4)$$

ここで、 $P^j(a, x)$ は回復に成功する AM シーケンス j の条件付き生起確率である。

さらに、プラントレベルの対応能力の信頼性を評価する。ここで、機能的余裕については、制約時間経過時点でのシステム機能裕度の確率分布に、また、時間的余裕については最低安全機能レベル達成時点での時間裕度の確率分布にそれぞれ着目する (Fig.2)。すなわち、 $M_F^j|_{T=T_{Lim}}$ 、

$M_T^j|_{L=L_{Lim}}$ の期待値 μ_{M_F} 、 μ_{M_T} および標準偏差 σ_{M_F} 、 σ_{M_T}

を用いて

$$\beta_F = \mu_{M_F}/\sigma_{M_F} \quad (5)$$

$$\beta_T = \mu_{M_T}/\sigma_{M_T} \quad (6)$$

を定義して評価する。 β_F 、 β_T は各 AM シーケンスの対応裕度と生起確率を縮約した対応能力の信頼性の尺度となっており、プラントレベルの対応能力の指標として考えることができる。

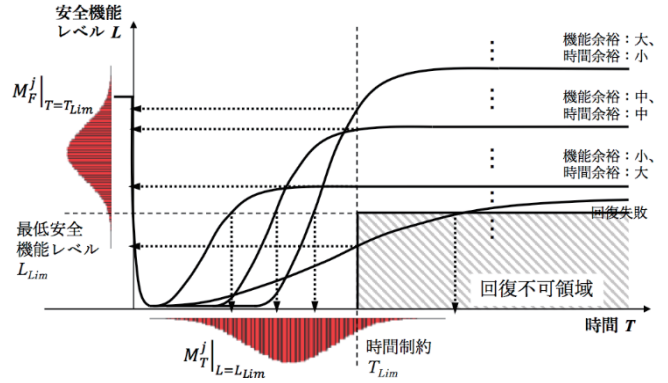


Fig.2 Schematic illustration of plant level response margin

3. 試評価条件の設定

適用事例として、「高速増殖炉の確率論的安全評価（レベル 1 PSA）に関する報告書」[5]で設定された事故シーケンスグループを対象に、レジリエンス指標の考え方に基づくシステム安全回復能力の試評価、重要度解析、耐性評価を行う。

事故シナリオの想定

文献[5]中の事故シーケンスグループのうち、「1 次冷却材漏えい（ガードベッセル内）」を想定する。また、ここではハザードとして地震を想定することとする。

AM 策の策定

1 次冷却材漏えい（ガードベッセル内）は、ガードベッセル内の配管または機器からの 1 次冷却材漏えい事象である。この時、原子炉停止機能として、原子炉トリップ信号が発生し制御棒が挿入される必要がある。崩壊熱除去機能の喪失を防止するには、原子炉容器液位確保が必要となるため、ガードベッセルが健全である必要が生じる。また、1 次主冷却系循環ポンプトリップが必要となる。通常運転時に、原子炉容器は 1 次アルゴンガス系により加圧されているため、漏えい量を抑制するには 1 次アルゴンガス系を隔離する必要がある。また、1 次ナトリウムオーバーフロー系の汲上げ運転による原子炉液位確保が必要となる。また、崩壊熱除去について、補助冷却設備強制循環、補助冷却設備自然循環、およびメンテナンス冷却系が緩和系統として期待できる。

したが、以下の措置により炉心の安定冷却を図る：

- (1) 原子炉保護系
- (2) 制御棒挿入
- (3) ガードベッセル健全性
- (4) 1 次主冷却系循環ポンプトリップ
- (5) 1 次アルゴンガス系隔離

- (6) 1次ナトリウムオーバーフロー系
- (7) 補助冷却設備強制循環
- (8) 補助冷却設備自然循環
- (9) メンテナンス冷却系

また、時間制約について、原子炉容器液位確保機能の回復（AM 措置(5)まで成功）に対する時間制約、崩壊熱除去機能の回復（AM 措置(7)、(8)または(9)まで成功）に対する時間制約がある。文献[5]中の簡易的・保守的評価では、それぞれおよそ 33 分、11 時間と評価されている。ここでは簡易的に、システム安全の回復（AM 策全体の成功）に対する時間制約を 33 分と設定した。

AM シーケンスの分析（イベントツリーの作成）

前述の AM 策に対し AM イベントツリーを作成する。補助冷却設備による崩壊熱除去措置（(7)および(8)）とメンテナンス冷却系による崩壊熱除去措置（(9)）とが冗長で並列系であり、また、それが原子炉停止措置（(1)および(2)）および原子炉容器液位確保措置（(3)～(6)）と直列の関係（つまり、原子炉停止措置、原子炉容器液位確保措置、崩壊熱除去措置措置のいずれか一つが失敗すれば回復失敗）にあるため、直並列系を成す AM 策である (Fig.3)。

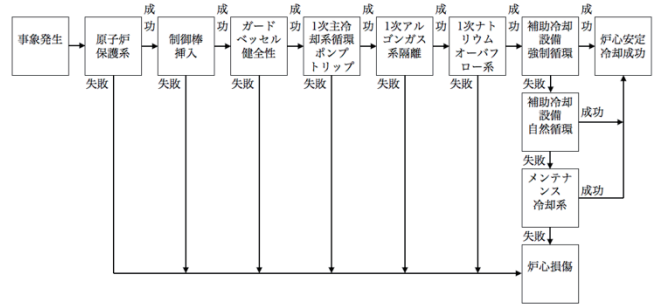


Fig.3 Accident management procedure

各 AM 措置の特徴量の評価

試評価に用いた各 AM 措置の特徴量を Table 1 に示す。

(a) 実行失敗確率の評価

フラジリティ評価について、本試評価条件ではハザードとして地震を想定している。ここでは簡易的に、各措置の代表機器について電力事業者による軽水炉の PRA 結果を参考に地震フラジリティパラメータ A_m 、 β_R 、 β_U を設定し、各措置のフラジリティ曲線 $f(a)$ として算定した。

$$f(a) = \Phi \left(\frac{\ln(a/A_m) + \beta_U \cdot \Phi^{-1}(p)}{\beta_R} \right) \quad (7)$$

ここで、 p は信頼度であり本稿では 50% とした。

Table 1 Evaluation condition

AM 措置	代表機器	フラジリティ	経年化／人的過誤 による失敗確率	所要時間	機能裕度
(1) 原子炉保護系	原子炉トリップ 遮断機	4 台 $A_m = 0.80$ [G] $\beta_R = 0.13$ $\beta_U = 0.23$	3.1E-07 [1/Demand]	0.01 分	1 x 4 台 = 4
(2) 制御棒挿入	制御棒駆動装置	2 台 $A_m = 3.02$ [G] $\beta_R = 0.25$ $\beta_U = 0.25$	2.6E-10 [1/Demand]	0.1 分	1 x 2 台 = 2
(3) ガードベッセル 健全性	ガードベッセル	1 台 $A_m = 9.62$ [G] $\beta_R = 0.22$ $\beta_U = 0.24$	8.8E-07 [1/Demand]	0.01 分	1
(4) 1 次主冷却系循環 ポンプトリップ	1 次冷却材ポンプ	1 台 $A_m = 2.06$ [G] $\beta_R = 0.19$ $\beta_U = 0.19$	3.1E-09 [1/Demand]	1 分	1
(5) 1 次アルゴンガス 系隔離	電動弁	1 台 $A_m = 3.74$ [G] $\beta_R = 0.30$ $\beta_U = 0.34$	4.6E-07 [1/Demand]	3 分	1
(6) 1 次ナトリウム オーバーフロー系	電動ポンプ	1 台 $A_m = 1.89$ [G] $\beta_R = 0.01$ $\beta_U = 0.06$	3.5E-06 [1/Demand]	3 分	1
(7) 補助冷却設備 強制循環	電動ポンプ	2 台 $A_m = 1.89$ [G] $\beta_R = 0.01$ $\beta_U = 0.06$	6.1E-03 [1/Demand]	3 分	1 x 2 台 = 2
(8) 補助冷却設備 自然循環	空気冷却機	3 台 $A_m = 1.99$ [G] $\beta_R = 0.08$ $\beta_U = 0.17$	1.7E-05 [1/Demand]	3 分	1 x 3 台 = 3
(9) メンテナンス 冷却系	電動ポンプ	1 台 $A_m = 1.89$ [G] $\beta_R = 0.01$ $\beta_U = 0.06$	1.4E-02 [1/Demand]	10 分	1

経年化評価および人間信頼性評価について、ここでは経年化または人的過誤に起因する各措置の実行失敗確率として、文献[5]によるアンアベイラビリティの定量評価結果を参考に設定した。

(b) 所要時間の評価

各措置について電力事業者による軽水炉の重大事故等対策の有効性評価結果等も参考に所要時間を設定した。なお、ここでは所要時間のハザード強度依存性は考慮しないこととする。

(c) 機能裕度の評価

最低安全機能レベルの値について、保守的取り扱いとして設計値を使用することとした。なお、ここでは機能裕度のハザード強度依存性は考慮しないこととする。

4. 試評価結果および考察

レジリエンス指標値評価（AM シーケンスの定量化、AM 有効性評価）

前章の評価条件に基づき、システム安全の回復に至る AM シーケンスの生起確率の積算値および対応裕度を評価した。ハザード強度 $a=0.0$ [G] とした場合に得られた各 AM シーケンスの生起確率を Fig.4 (左) に示す。原子炉停止 (AM 措置(1),(2)) および原子炉容器液位確保 (AM 措置(3)~(6)) に成功し、AM 措置(7) (補助冷却設備強制循環) により崩壊熱除去に成功する「Seq.1」が支配的なパスとして生起した。Fig.4 (中) は各 AM シーケンスの回復経路 (システム機能裕度の時刻歴) を示しており、太矢印は「Seq.1」の回復経路である。総所要時間 10.12 分 (<33 分) でシステム機能裕度 $M_F=1.0$ (≥ 1.0) に至っており、設定された「回復不可領域」(図中、右下の灰色部) を通過していないため回復成功シーケンスであるこ

とが見てとれる。このとき条件付きシステム回復成功確率 $P_{Recov}(a=0.0, x)=0.999995$ となった。また、Fig.4 (右) に対応裕度の生起確率分布を示す。式(5),(6)よりプラントレベルの対応裕度を求めると、システム機能裕度について、 $\mu_{MF}=0.999995$, $\sigma_{MF}=0.002270$, $\beta_F=440.5$ 、時間裕度について、 $\mu_{MT}=3.260853$, $\sigma_{MT}=0.0074156$, $\beta_T=439.7$ となった。

同様に、ハザード強度 $a=1.0$ [G] とした場合に得られた各 AM シーケンスの生起確率を Fig.5 (左) に示す。図中、白色部は回復成功シーケンスを、斜線部は回復失敗シーケンスをそれぞれ表している。 $a=1.0$ [G] の場合、「Seq.1」に加え、AM 措置(1) (原子炉保護系) による原子炉停止系作動に失敗する「Seq.17」が主たるシーケンスとして生起した。これは、本試評価の条件 (Table 1) において、AM 措置(1) (原子炉保護系) の fragility パラメータ A_m が最小 ($A_m=0.8$ [G]) のためである。このとき条件付きシステム回復成功確率 $P_{Recov}(a=1.0, x)=0.163$ となった。また、Fig.5 (右) に対応裕度の生起確率分布を示す。プラントレベルの対応裕度を求めると、システム機能裕度に

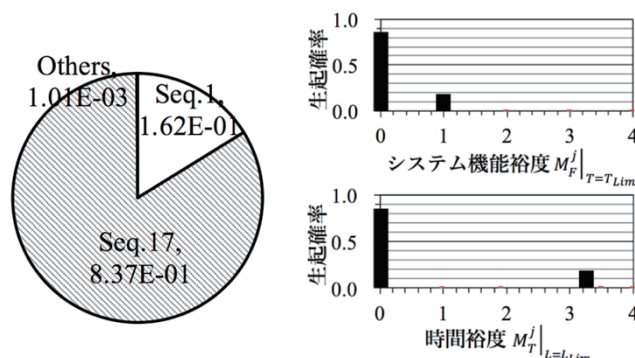


Fig.5 (Left) Occurrence probability of each AM sequence and (Right) probability distribution of plant level response margin: $a=1.0$ [G]

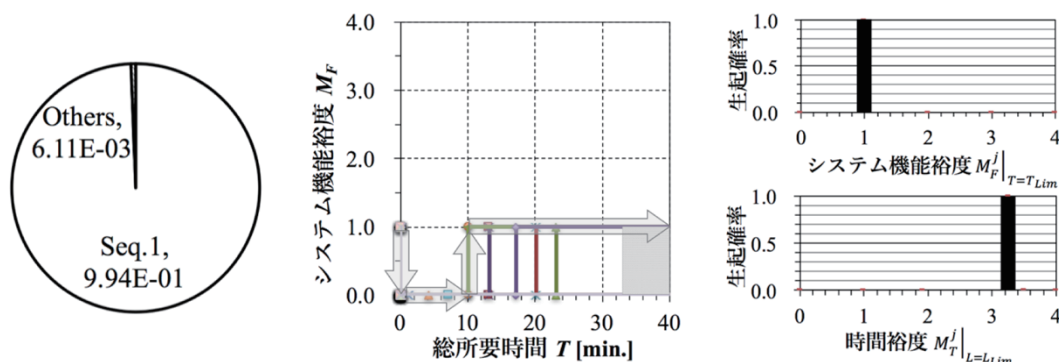


Fig.4 (Left) Occurrence probability of each AM sequence, (Center) time series of system functional margin and (Right) probability distribution of plant level response margin: $a=0.0$ [G]

ついて、 $\mu_{MF}=0.162707$, $\sigma_{MF}=0.369098$, $\beta_F=0.440824$ 、時間裕度について、 $\mu_{MT}=0.530567$, $\sigma_{MT}=1.203582$, $\beta_T=0.440824$ となった。

脆弱性の抽出

(a) 重要度解析

各 AM 措置がシステム安全回復能力に及ぼす影響を定量評価するために、ここでは各 AM 措置の内的事象（経年化または人的過誤）に起因する実行失敗確率の変化に対するプラントレベル対応裕度の感度を評価した。

ハザード強度 $a = 0.0$ [G] における算出結果を Fig.6 に示す。本試評価条件では、AM 措置(6) (1 次ナトリウムオーバーフロー系) が、プラントレベル機能裕度、プラントレベル時間裕度における重要度の観点から抽出されている。外力の無い条件に対する本結果は、レベル 1 PSA[5]における結果と整合している。

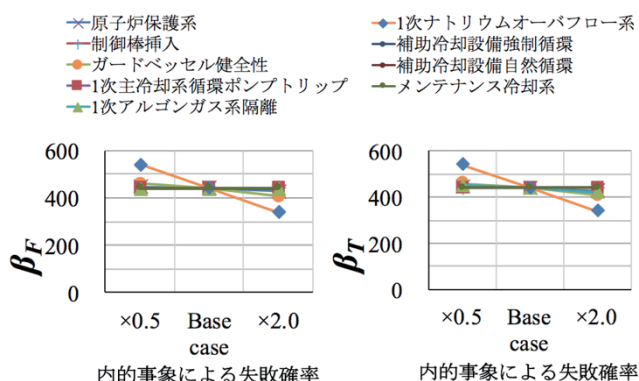


Fig.6 Sensitivity of plant level response margin to execution failure probability due to internal event of each AM measure: $a = 0.0$ [G]

(b) 耐性評価

ハザード強度を $0.0 \sim 1.0$ [G] まで 0.2 [G] 刻みで変化させ、条件付きシステム回復成功確率およびプラントレベル対応裕度のハザード強度依存性を評価した結果を Fig.7 にそれぞれ示す。本評価設定においては、システム安全回復成功確率については、 $a = 0.8$ [G] 付近以降で大きく低下する振る舞いを示している。プラントレベル対応裕度については、機能裕度、時間裕度ともに $a = 0.4$ [G] 付近まで非常に大きな余裕を持ち、それ以降、潜在的な対応余裕が徐々に減少していく振る舞いを示している。

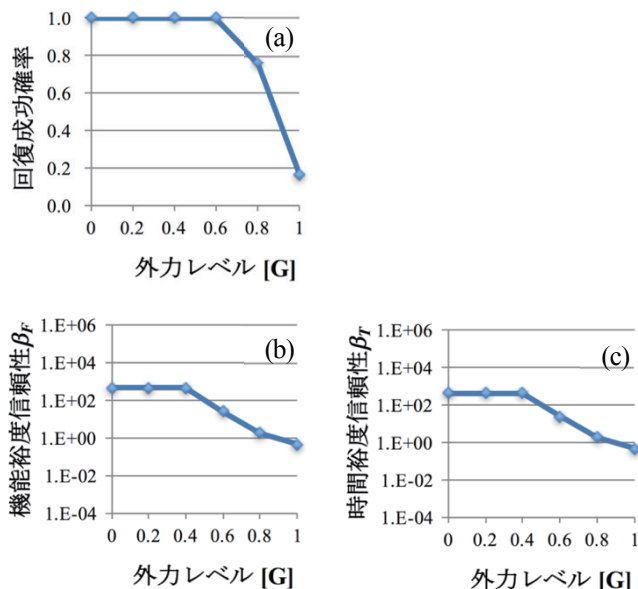


Fig.7 Hazard intensity dependency: (a) success probability of system recovery, (b) plant level functional margin, and (c) plant level time margin

5. 結論

設計想定を超える事態に対する原子力プラントのシステム安全を評価するための指標として提案しているレジリエンス指標を、簡易的な高速炉プラントモデルに適用した。事故シーケンス「1 次冷却材漏えい (ガードベッセル内)」を対象に、レジリエンス指標の考え方に基いてシステム安全回復能力の試評価、重要度解析、耐性評価を行った。

今後の課題として、サポート系の考慮等のプラントモデルの詳細化、所要時間・機能裕度のハザード強度依存性等の評価条件の詳細化に加え、特に高速炉への適用性の観点からは段階的な時間制約を適切に取り入れることが必要である。その上で、軽水炉の冷却材喪失事故に対するレジリエンス評価と比較することで、炉型の違いがレジリエンスに与える影響を定量評価可能になる。

参考文献

- [1] E. Hollnagel, D.D. Woods and N. Leveson (Eds.): “Resilience engineering: Concepts and precepts”, Ashgate Pub Co. (2006)
- [2] L. Carlson, G. Bassett, W. Buehring et al.: “Resilience: Theory and applications”, Argonne National Laboratory, ANL/DIS-12-1 (2012)
- [3] K. Demachi, M. Suzuki, H. Miyano et al.: “Development

- of resilience evaluation method for nuclear power plants (Part 1: Proposal of resilience index for assessment index of safety of nuclear power plant under severe accident)", E-Journal of Advanced Maintenance, Vol.8, No.2, pp.23-31 (2016)
- [4] M. Suzuki, K. Demachi, H. Miyano et al.: "Development of resilience evaluation method for nuclear power plants (Part 3: Study on evaluation method and applicability of resilience index)", E-Journal of Advanced Maintenance, Vol.9, No.1, pp.1-14 (2017)
- [5] 原子力発電技術機構原子力安全解析所: "平成 14 年度高速増殖炉の確率論的安全評価 (レベル 1 PSA) に関する報告書", INS/MO2-73 (2003)

