



## 原子力プラントにおけるレジリエンス評価法の開発 (その3: レジリエンス指標の評価法と 適用性に関する検討)

Development of Resilience Evaluation Method for Nuclear Power Plants  
(Part 3: Study on Evaluation Method and Applicability of Resilience Index)

東京大学	鈴木 正昭	Masaaki SUZUKI	Member
東京大学	出町 和之	Kazuyuki DEMACHI	Member
東京大学	村上 健太	Kenta MURAKAMI	Member
東京大学	糸井 達哉	Tatsuya ITOI	Member
東京大学	笠原 直人	Naoto KASAHARA	Member
法政大学	宮野 廣	Hiroshi MIYANO	Member
大阪大学	中村 隆夫	Takao NAKAMURA	Member
日本原子力学会	荒井 滋喜	Shigeki ARAI	Non-member
原子力安全システム研究所	釜谷 昌幸	Masayuki KAMAYA	Member
日本保全学会	山口 篤憲	Atsunori YAMAGUCHI	Member
三菱総合研究所	松本 昌昭	Masaaki MATSUMOTO	Non-member

We have developed a new index, called the resilience index, that evaluates the dynamic stability of the system safety of a nuclear power plant during a severe accident by considering the ability to recover system safety functions that have become lost in the situation. In this paper, a detailed evaluation procedure for the resilience index is described. The system safety of a PWR plant during a severe accident is then assessed according to the resilience index in order to discuss the applicability of the index. We find that the resilience index successfully represents management capability and, therefore, the resilience capability of a nuclear power plant.

**Keywords:** System Safety, Safety Assessment, Severe Accident, Accident Management, Resilience, Safety Margin

### 1. 序論

レジリエンスとは、分野や文脈によってその定義や意味合いに幅を持つが、システム内外の変動に起因する擾乱に対してシステムが動的に適応し、その果たすべき機能を平常に保つ、あるいは機能を喪失したとしても適切に回復できる能力を意味する(例えば[1][2])。原子力分野におけるレジリエンスの重要な代表例が、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である。

設計想定を超える事態に対す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の

観点からの評価、すなわち、どの程度の確からしさで、どの程度の余裕(機能的余裕、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余裕(「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が、高い粘り強さを持つ安全の確保のために重要である。

本研究では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する[3][4]。AM策の一連の措置に関して、PRAにおいては成功基準

に照らして成功/失敗の二値評価であり、所要時間や対応裕度について陽には示されない。一方、レジリエンス指標評価においては所要時間や対応裕度をそれらの累積（積み上げ）を考慮しながら定量評価して陽に明示することに特色があり、AM 策や保全活動（要員教育・訓練等を含む）の変更等による対応裕度への影響を評価することが出来る。本稿ではレジリエンス指標の具体的な評価手順を示すとともに、簡易的なPWRプラントモデルに対して試評価を行うことで、レジリエンス指標の適用性を示す。

## 2. レジリエンス指標の評価法

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。原子力プラントではAM策を実行し一時的に喪失した安全機能を回復するための一連の措置を講ずるが、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ると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。

### 2.1 レジリエンス指標評価手順

レジリエンス指標の具体的な評価手順について述べる。

評価に際しては、システムの安全機能レベルの時間変化

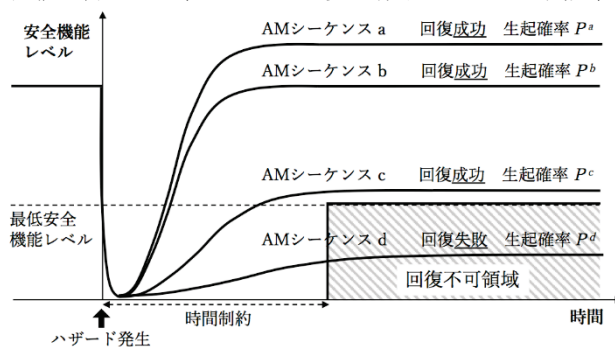


Fig.1 Recovery of safety function

を考える。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

#### 2.1.1 事故シナリオの想定

解析の対象とするプラントの構成・特性の調査、およびリスクの観点で重要な事故シーケンスを同定した上で、想定するハザードおよびプラント損傷状態を評価・設定する。既往のPRAやAM整備の結果等を活用することができる。

#### 2.1.2 AM策の策定

2.1.1項で設定したプラント損傷状態に対して、安全機能回復に係る実施可能な手段および運転員操作を分析し、AM策を設定する。また、最低安全機能レベルの達成が必要となるまでの時間的な制約を評価・設定する。既往のPRAやAM整備の結果等を活用することができる。

#### 2.1.3 AMシーケンスの分析（イベントツリーの作成）

システムの回復の進展を評価するために、AMシーケンスのモデル化を行う。前項までに設定したプラント損傷状態およびAM策に基づいて、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、AM策中のある措置による機能回復の度合

いが必要とするレベルまでは達さない部分的なものであっても、以降の措置に機能的・時間的余裕を生むことをモデル化する。すなわち、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。例えば、必要とする給水機能レベルが 100 [m<sup>3</sup>/h] であるときに、1 つ目の給水措置の実行には成功したが何らかの事由によりその給水機能が 60 [m<sup>3</sup>/h] にとどまった場合、「実行に成功」したが「機能回復に失敗」したとして後段の給水措置を実行する。このとき、1 つ目の給水措置の実行成功による部分的な機能回復 (60 [m<sup>3</sup>/h]) があるため、2 つ目の給水措置としてはその累積を考慮して 40 [m<sup>3</sup>/h] の機能を発揮できれば「機能回復に成功」と判断する。

#### 2.1.4 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、以下に述べる実行失敗確率、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。

##### (a) 実行失敗確率の評価

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

- ・外力に起因する構築物・機器の損傷
- ・経年化に起因する構築物・機器の劣化、ランダム故障
- ・人的過誤

等を考慮する。上記各要因の評価のためにそれぞれフラジリティ評価、経年化評価、人間信頼性評価等を行い、当該 AM 措置  $i$  の実行失敗確率  $p_f^i$  を評価する。なお、経年化評価に際しては「保全指標」[5]を用いることができる。また、人間信頼性評価に際しては、高ストレス状態が人的過誤確率に及ぼす影響などとして事故時雰囲気条件を考慮する。

##### (b) 所要時間の評価

個々の AM 措置  $i$  の実行に要する時間  $t^i$  を評価する。訓練時の結果等を用いることができる。また、現場への接近性や現場の作業性が所要時間に及ぼす影響などとして事故時雰囲気条件を考慮する。

当該 AM 措置が動作を期待する機器の機能喪失等により実行できない (実行失敗) 場合、その所要時間は  $t^i = 0$  と考える。

##### (c) 機能裕度の評価

個々の AM 措置に期待される機能レベルが目標とする

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。そのために、各 AM 措置について、その措置 (例: 高圧注入系による炉心注入) の有する機能の種別 (例: 給水機能) およびレベル (例: 150 [m<sup>3</sup>/h]) を評価する。また、各々の機能について、最低安全機能レベル (例: 100 [m<sup>3</sup>/h]) を評価する。このとき、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。例: 150 [m<sup>3</sup>/h] / 100 [m<sup>3</sup>/h] = 1.5) を当該措置の機能裕度  $m^i$  として定義する。

最低安全機能レベルの値は、現実的評価においては安全解析等による最適評価値を使用する。最適評価値が明確でない場合には、設計値を使用するといった保守的な取り扱いをしてもよい。

#### 2.1.5 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、前項までに作成・設定した AM イベントツリーおよび各 AM 措置の特徴量を用いて、以下に述べる各 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。

##### (a) 各 AM シーケンスの生起確率の評価

2.1.4(a)項で評価した各ヘディング (AM 措置) の分岐確率から、2.1.1 項で評価・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。

##### (b) 各 AM シーケンスの累積所要時間の評価

2.1.4(b)項で評価した各 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。

##### (c) 各 AM シーケンスのシステム機能裕度の評価

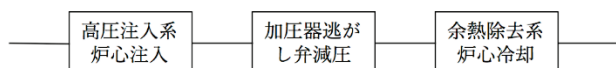
システム安全の回復の度合いを評価するために、2.1.4(c)項で評価した各 AM 措置の機能裕度から、各 AM シーケンス  $j$  について以下に述べるシステムの機能裕度を求める。

**AM 策が直列系を成す場合** Fig.2 に示すような直列系を成す 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、

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

(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。ここで、個々の AM 措置の有する機能レベルは、例えば地震動による設備の部分的損傷等により機能低下する可能性があるなど、ハザード強度等に依存することから、機能裕度、システム機能裕度、ならびにシステム回復の成否もまたハザード強度等に依存することとなる。



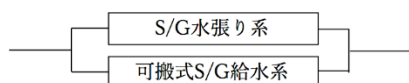
	(1) 高圧注入系	(2) 加圧器逃がし弁	(3) 余熱除去系
最低安全機能レベル	$L_{Lim}^a = 100 \text{ m}^3/\text{h}$	$L_{Lim}^b = 120 \text{ m}^3/\text{h}$	$L_{Lim}^c = 5 \text{ MW}$
機能レベル	$L^{(1)} = 120 \text{ m}^3/\text{h}$	$L^{(2)} = 120 \text{ m}^3/\text{h}$	$L^{(3)} = 10 \text{ MW}$
機能裕度	$m^{(1)} = 1.2$	$m^{(2)} = 1.0$	$m^{(3)} = 2.0$
システム機能裕度	$M_F = \min[m^*] = 1.0$		

Fig.2 Example calculation of system functional margin in a series system

**AM 策が並列系を成す場合** Fig.3 に示すような並列系を成す 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。ここで、最低安全機能レベルの値について最適評価値が明確でなく設計値を使用する場合には、当該並列系を構成する措置のうち最も機能レベルの低い措置の設計値を最低安全機能レベルの値として使用してもよい。



	(1) S/G水張り系	(2) 可搬式S/G給水系
最低安全機能レベル	$L_{Lim}^a = 100 \text{ m}^3/\text{h}$	
機能レベル	$L^{(1)} = 120 \text{ m}^3/\text{h}$	$L^{(2)} = 100 \text{ m}^3/\text{h}$
機能裕度	$m^{(1)} = 1.2$	$m^{(2)} = 1.0$
システム機能裕度	$M_F = \sum m^* = 2.2$	

Fig.3 Example calculation of system functional margin in a parallel system

**AM 策が直並列系を成す場合** Fig.4 に示すような直並列系を成す 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システム機能裕度を求め

ることができる。

(d) 各 AM シーケンスの時間裕度の評価

各 AM シーケンス  $j$  について、2.1.2 項で評価・設定し



	(1) S/G水張り系	(2) 可搬式S/G給水系	(3) AM主蒸気逃がし弁
最低安全機能レベル	$L_{Lim}^a = 100 \text{ m}^3/\text{h}$		$L_{Lim}^b = 120 \text{ m}^3/\text{h}$
機能レベル	$L^{(1)} = 120 \text{ m}^3/\text{h}$	$L^{(2)} = 100 \text{ m}^3/\text{h}$	$L^{(3)} = 150 \text{ m}^3/\text{h}$
機能裕度	$m^{(1)} = 1.2$	$m^{(2)} = 1.0$	$m^{(3)} = 1.25$
システム機能裕度	$M_F = \min[m^{(1)+m^{(2)}, m^{(3)}] = \min[2.2, 1.25] = 1.25$		

Fig.4 Example calculation of system functional margin in a series-parallel system

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。

(e) 各 AM シーケンスの回復成否の評価

上記で評価した各 AM シーケンスのシステム機能裕度（あるいは時間裕度）から、各 AM シーケンスの回復成否を判断する。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」を通らず、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 2.1.5(a)~(e)項の結果から、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確率  $P_{Recov}(a, x)$  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.5)。すなわち、

$$M_F^j|_{T=T_{Lim}}, M_T^j|_{L=L_{Lim}} \text{ の期待値}$$

$$\mu_{M_F} = \sum_j P^j M_F^j|_{T=T_{Lim}} \quad (5)$$

$$\mu_{M_T} = \sum_j P^j M_T^j|_{L=L_{Lim}} \quad (6)$$

標準偏差

$$\sigma_{M_F} = \left\{ \sum_j P^j \left( M_F^j |_{T=T_{Lim}} - \mu_{M_F} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (7)$$

$$\sigma_{M_T} = \left\{ \sum_j P^j \left( M_T^j |_{L=L_{Lim}} - \mu_{M_T} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (8)$$

を用いて

$$\beta_F = \mu_{M_F} / \sigma_{M_F} \quad (9)$$

$$\beta_T = \mu_{M_T} / \sigma_{M_T} \quad (10)$$

を定義して評価する。 $\beta_F$ 、 $\beta_T$ 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。

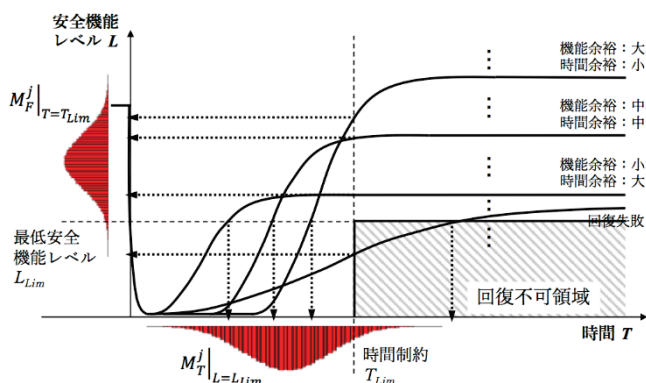


Fig.5 Schematic illustration of plant level response margin

### 2.1.6 脆弱性の抽出 (重要度解析、耐性評価)

個別機器・要員の信頼性・保全性・対応能力とシステム安全回復能力との関係を明らかにし潜在的な脆弱性を把握するため、重要度解析およびレジリエンス指標のハザード強度依存性評価等を実施する。

## 3. 試評価条件の設定

適用事例として、PWR プラントに対する原子力規制委員会「実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性の評価に関する審査ガイド」に規定する事故シーケンスグループを対象に、異なる2ケースのAM策について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を行う。

### 3.1 事故シナリオの想定

審査ガイド中、PWR に対して炉心損傷防止対策に係る有効性の評価対象として指定されている事故シーケンスグループのうち、「2次冷却系からの除熱機能喪失」を想定する。本重要事故シーケンスでは補助給水系および主

蒸気逃がし弁または安全弁による2次冷却系からの除熱機能喪失を仮定することが要求されている。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。

### 3.2 AM 策の策定

審査ガイドでは対策例として、加圧器逃がし弁と高圧注入系によるフィードアンドブリード、蒸気発生器を用いた代替の崩壊熱除去機能の確保を示している。

ここでは以下の2ケースのAM策を仮定し、試評価結果を比較することとする。

#### ケース(A) : 1次系からの除熱のみ考慮する場合 (Fig.6)

以下の措置により炉心の安定冷却を図る。

- (1) 高圧注入系による炉心注入
- (2) 加圧器逃がし弁による1次系減圧
- (3) 余熱除去系による炉心冷却

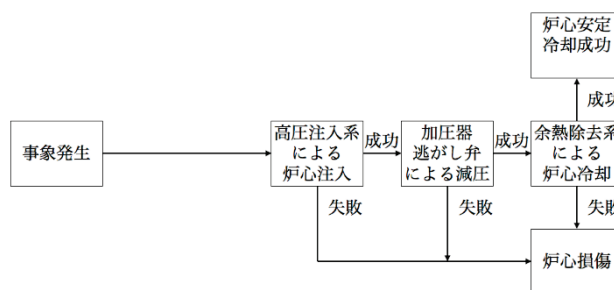


Fig.6 Accident management procedure: Case (A)

#### ケース(B) : 1次系および2次系からの除熱を考慮する場合 (Fig.7)

上記ケース(A)の1次系からの除熱に加え、2次系からの除熱を考慮する。2次系の安全系の除熱設備は機能喪失しているため、AM設備として除熱設備を設ける必要がある。蒸気発生器(S/G)への注水設備と蒸気放出設備として以下の2設備を設ける。

- (4) 可搬式S/G給水設備
- (5) AM主蒸気逃がし弁

また、非安全系設備で本事故時に活用できる設備として以下の設備がある。

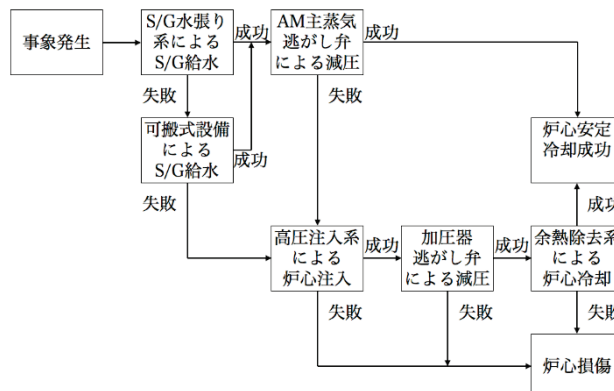


Fig.7 Accident management procedure: Case (B)

(6) S/G 水張り系

また、時間制約について、PWR 電力事業者による重大事故等対策の有効性評価等を参考に事象発生後約29分とする。但し、いま試評価計算上 AM 策中で陽には考慮していない、事象発生直後の「状況判断 10分」をそこから減じ、19分を試評価計算上の制約時間として用いる。

3.3 AM シーケンスの分析 (イベントツリーの作成)

前述の2ケースのAM策のそれぞれに対しAMイベントツリーを作成する。ケース(A)のAM策は、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に回復失敗となるため、Fig.2に示した直列系を成すAM策である。このときケース(A)で起こり得る全AMシーケンス数は4パスである。ケース(B)のAM策は、2次系における可搬式S/G給水設備による給水措置とS/G水張り系による給水措置とが冗長で並列系であり、また、それがAM主蒸気逃がし弁による熱放出措置と直列の関係(つまり、給水措置と熱放出措置のいずれか一方が失敗すれば回復失敗)にある。さらに、2次系からの除熱と1次系からの除熱とが冗長で並列系を成すことから、直並列系を成すAM策である。このときケース(B)で起こり得る全AMシーケンス数は39パスである。

3.4 各AM措置の特徴量の評価

本稿では簡単のため、各措置において動作が期待される機器・設備のうち主たる機器のみを考え、また、人的過誤は考慮しない(理想的に訓練されていると仮定することとする。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** 本試評価条件ではハザードとして地震を想定しているため、各措置の代表機器についてPWR電力事業者によるPRA結果を参考に地震フラジリティパラメータ  $A_m$ ,  $\beta_R$ ,  $\beta_U$  [6]を設定し、フラジリティ曲線  $f(a)$  を算定した。

$$f(a) = \Phi \left( \frac{\ln(a/A_m) + \beta_U \Phi^{-1}(p)}{\beta_R} \right) \quad (11)$$

ここで、 $p$ は信頼度であり本稿では50%とした。

**経年変化評価** 各措置の代表機器についてNUCIAデータを参考に、さらに「保全指標」[5]の考え方に基づき経年変化および保全活動の影響を簡易的に考慮して故障率を設定した。保全指標とは、経年変化と保全活動の影響を考慮した、原子力プラントの安全上重要な機能の信頼性を表すための指標である。保全指標値の評価手順中、例えば動的機器の故障率評価においては、各故障モードの故障率を、原因別故障率に分解して表現した上で、時間依存性を考慮する。そして、種々の保全活動による故障率の低減/増加を評価する。その際、故障原因によって有効な保全活動が異なることをモデル化する。本試評価では、例えば電動ポンプの場合、その起動失敗確率が4.3E-05 [1/Demand]であるとする。ここで、起動失敗に関係する劣化要因として摺動部固着と電気計装制御系劣化を考え、起動失敗に対する両者の寄与度(起動失敗事例数に占める各原因の割合)を工学的判断により9:1とする。今、簡単に、摺動部については適当な間隔の定期試験により確認され続けるとすれば継続する劣化は電気計装制

Table 1 Evaluation conditions

AM 措置	代表機器		フラジリティ		故障率	所要時間	機能裕度
(1) 高圧注入系による 炉心注入	電動ポンプ (150 [m <sup>3</sup> /h])	2 台	$A_m = 4.80$ [G]	$\beta_R = 0.08$ $\beta_U = 0.17$	4.3E-06 [1/demand] (1 台あたり)	1.5 分	1 x 2 台 = 2
(2) 加圧器逃がし弁による 1次系減圧	空気作動弁 (100 [m <sup>3</sup> /h])	3 台	$A_m = 4.13$ [G]	$\beta_R = 0.21$ $\beta_U = 0.25$	1.5E-06 [1/demand] (1 台あたり)	1.5 分	1 x 3 台 = 3
(3) 余熱除去系による 炉心冷却	電動ポンプ + 電動弁	2 系統	$A_m = 3.01$ [G]	$\beta_R = 0.13$ $\beta_U = 0.23$	7.7E-06 [1/demand] (1 系統あたり)	3 分	1 x 2 系統 = 2
(4) 可搬式設備による S/G 給水	電動ポンプ (160 [m <sup>3</sup> /h])	1 台	$A_m = 5.00$ [G]	$\beta_R = 0.15$ $\beta_U = 0.50$	4.3E-06 [1/demand] (1 台あたり)	10 分	1.07
(5) AM 主蒸気逃がし 弁による減圧	空気作動弁 (180 [m <sup>3</sup> /h])	1 台	$A_m = 3.03$ [G]	$\beta_R = 0.21$ $\beta_U = 0.25$	1.5E-06 [1/demand] (1 台あたり)	3 分	1.8
(6) S/G 水張り系によ る S/G 給水	電動ポンプ (160 [m <sup>3</sup> /h])	1 台	$A_m = 1.03$ [G]	$\beta_R = 0.20$ $\beta_U = 0.19$	4.3E-06 [1/demand] (1 台あたり)	3 分	1.07

御系のみとなるため、機器故障率は上述の寄与度を考慮して  $4.3E-05 \times 0.1 = 4.3E-06$  [1/Demand] と設定した。

### (b) 所要時間の評価

各措置について PWR 電力事業者による重大事故等対策の有効性評価結果を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

各措置について設置許可申請書の機器設計仕様等を参考に機能裕度を設定した。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

### 4.1 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。

#### AM ケース(A): 1次系からの除熱のみを考慮する場合

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.8 左に示す。いずれの AM 措置(1)~(3)も成功する「Seq.1」が支配的なパスとして生起した。Fig.8 右は各 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 6 分 (< 19 分) でシステム機能裕度  $M_F = 2.0$  (> 1.0) に至っており、設定された「回復不可領域」(図中、斜線部)を通過していないため回復

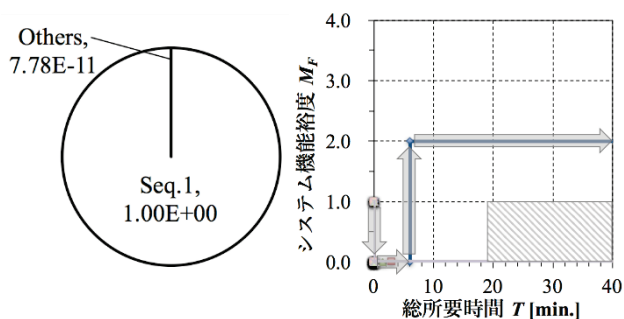


Fig.8 Occurrence probability of each AM sequence (Left) and time series of system functional margin (Right):  
 AM Case (A),  $a = 0.0$  [G]

成功シーケンスであることが見てとれる。いま「Seq.1」以外は回復失敗シーケンスであり、条件付きシステム回復成功確率  $P_{Recov}(a = 0, x) = 1 - 7.78E-11$  となった。

同様に、ハザード強度  $a = 3.0$  [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.9 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。 $a = 3.0$  [G] の場合、「Seq.1」に加え「Seq.2」が主たるシーケンスとして生起した。

「Seq.2」は AM 措置(1) (高圧注入系による炉心注入)、および措置(2) (加圧器逃がし弁による 1 次系減圧)に成功し、措置(3) (余熱除去系による炉心冷却)に失敗するシーケンスである。このとき条件付きシステム回復成功確率  $P_{Recov}(a = 3.0, x) = 0.48$  となった。また、Fig.9 右に対応裕度の生起確率分布を示す。式(5)~(10)よりプラントレベルの対応裕度  $\beta_F$ 、 $\beta_T$  を求めると  $\beta_F = 0.96$ 、 $\beta_T = 0.96$  となった。 $a = 5.0$  [G] の場合、AM 措置(1)に失敗する「Seq.4」をはじめ回復失敗シーケンスが支配的となり、このとき条件付きシステム回復成功確率  $P_{Recov}(a = 5.0, x) = 2.62E-06$  となった。

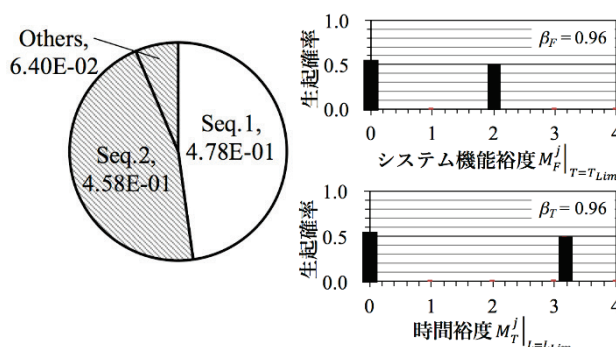


Fig.9 Occurrence probability of each AM sequence (Left) and probability distribution of plant level response margin (Right): AM Case (A),  $a = 3.0$  [G]

#### AM ケース(B): 1次系および2次系からの除熱を考慮する場合

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.10 左に示す。AM 措置(6) (S/G 水張り系による S/G 給水) および措置(5) (AM 主蒸気逃がし弁による減圧)に成功する「Seq.1」が支配的なパスとして生起した。Fig.10 右は各 AM シーケンスの回復経路を示しており、太矢印は「Seq.1」の回復経路である。総所要時間 6 分 (< 19 分) でシステム機能裕度  $M_F = 1.07$  (> 1.0) に至っており、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  $P_{Recov}(a = 0, x) = 1 - 1.17E-16$  となった。

Fig.10 と Fig.8 (AM ケース(A)の結果) とを比較すると、条件付きシステム安全回復成功確率がともにほぼ 1 で同等であっても、より多様な AM 措置を設けた AM ケース (B) では潜在的により大きな対応裕度を持つシーケンスがより多く存在することを定量的に可視化できている。

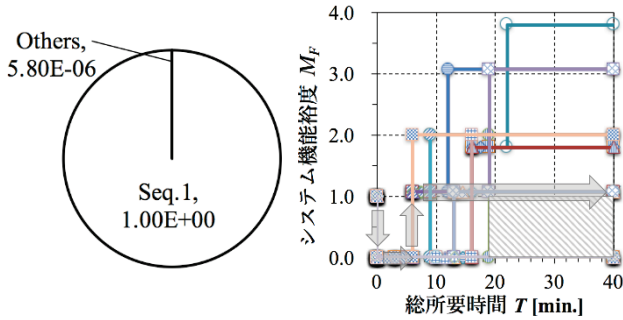


Fig.10 Occurrence probability of each AM sequence (Left) and time series of system functional margin (Right): AM Case (B), a = 0.0 [G]

同様に、ハザード強度  $a = 3.0$  [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.11 左に示す。 $a = 3.0$  [G] の場合、回復成功シーケンス「Seq.27」、「Seq.32」に加え主たる回復失敗シーケンスとして「Seq.33」が生起した。「Seq.33」は AM 措置(6)、(5)の失敗により 2 次系からの除熱に失敗し、さらに措置(3)の失敗により 1 次系からの除熱に失敗するシーケンスである。このとき条件付きシステム回復成功確率  $P_{Recov}(a = 3.0, x) = 0.75$  となった。また、Fig.11 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  $\beta_F = 1.46$ 、 $\beta_T = 1.70$  となった。同一のハザード強度  $a = 3.0$  [G] について AM ケース(A)の結果 (Fig.9,  $P_{Recov}(a = 3.0, x) = 0.48$ ,  $\beta_F = 0.96$ ,  $\beta_T = 0.96$ ) と比較すると、システム回復成功確率  $P_{Recov}$  およびプラントレベルの対応信頼

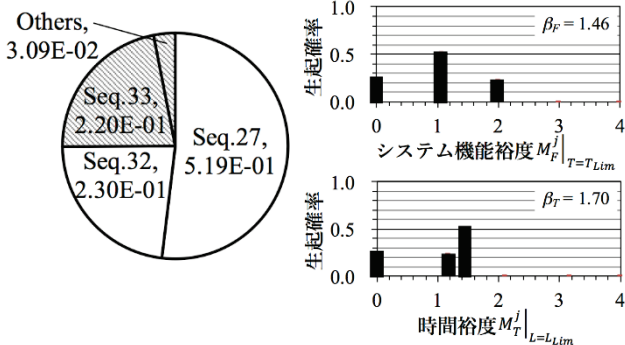


Fig.11 Occurrence probability of each AM sequence (Left) and probability distribution of plant level response margin (Right): AM Case (B), a = 3.0 [G]

性  $\beta_F$ 、 $\beta_T$  ともに向上していることが分かり、AM 策の変更・改善の有効性を回復成功/失敗確率に加えて裕度の観点から定量評価出来ている。 $a = 5.0$  [G] の場合、回復失敗シーケンスが支配的となり、このとき条件付きシステム回復成功確率  $P_{Recov}(a = 5.0, x) = 4.27E-03$  となった。

## 4.2 脆弱性の抽出

### 4.2.1 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、各 AM 措置について、本試評価では条件付きシステム回復成功確率  $P_{Recov}(a, x)$  から次式により Fussell-Vesely 指標に相当する値  $FVe$  およびリスク増加価値 (RAW) に相当する値  $RAW_e$  を算出し評価した。

$$FVe(a, x) = \frac{(1 - P_{Recov}(a, x)) - (1 - P_{Recov}(a, x)|_{P_f=0})}{1 - P_{Recov}(a, x)} \quad (12)$$

$$RAW_e(a, x) = \frac{(1 - P_{Recov}(a, x)|_{P_f=1})}{1 - P_{Recov}(a, x)} \quad (13)$$

AM ケース(B)について、ハザード強度  $a = 3.0$  [G] における算出結果を Fig.12 に示す。本試評価条件では、AM 措置(5) (AM 主蒸気逃がし弁による減圧) および措置(3) (余熱除去系による炉心冷却) が、システム安全回復能力における重要度の観点から抽出されている。なお、プラントレベルの対応信頼性  $\beta_F$ 、 $\beta_T$  を用いて同様の評価を行うことで、対応裕度における重要度の観点から AM 措置を抽出することが可能である。

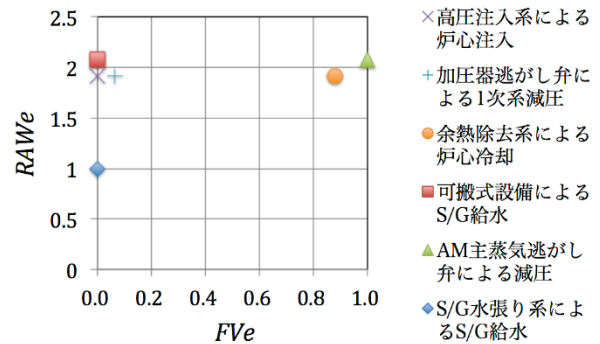


Fig.12 Importance values equivalent to FV and RAW importance: AM Case(B), a = 3.0 [G]

### 4.2.2 耐性評価

ハザード強度を 0.0~5.0 [G] まで 0.5 [G] 刻みで変化



させ、条件付きシステム回復成功確率のハザード強度依存性を評価した結果を Fig.13 に示す。図中、AM ケース(A) およびケース(B)に対する結果をともに示している。前述のとおりケース(B)において、2 次系からの除熱措置も考慮することによる回復成功シーケンス数の増加によりシステム回復成功確率が向上していることが分かる。クリフエッジ効果の観点からは、大局的には両 AM ケースとも  $a = 3.0$  [G] 付近でシステム安全回復成功確率が大きく低下する振る舞いを共通的に示している。本試評価条件では、2 次系からの除熱措置において最も耐震余裕の小さい措置(5) (AM 主蒸気逃がし弁による減圧) の fragility ( $A_m = 3.03$  [G]) と、1 次系からの除熱措置において最も耐震余裕の小さい措置(3) (余熱除去系による炉心冷却) の fragility ( $A_m = 3.01$  [G]) とが類似のためである。これは、前項の重要度解析の結果と対応している。

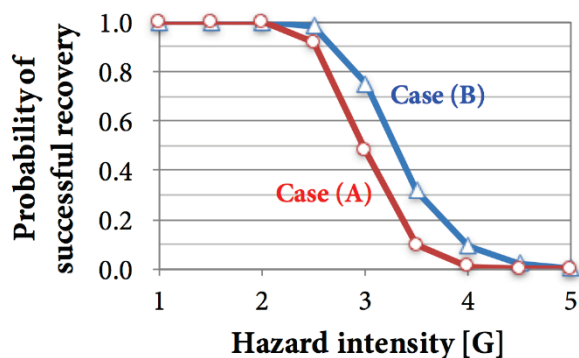


Fig.13 Hazard intensity dependency of probability of successful system recovery

## 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について、具体的な評価手順を示した。評価に際しては、最低安全機能レベルに対する余裕と時間制約に対する余裕、およびそれらの時間変化を考える。さらに、簡易的な PWR プラントモデルに対して、原子力規制委員会審査ガイドに規定の事故シーケンス「2 次冷却系からの除熱機能喪失」を対象に、レジリエンス指標の考えに基づくシステム安全回復能力の試評価を行った。レジリエンス指標の考えに基づくことで、システム安

全の回復に至る AM シーケンスの定量化、AM 策の変更・改善による回復成功確率およびそのハザード強度依存性、対応裕度、対応信頼性の変化の定量評価、および各 AM 措置がシステム安全回復能力に及ぼす影響の定量評価等が可能であることを示した。人的過誤を具体的に考慮した試評価および検討は今後の重要な課題である。

## 謝辞

本研究は、株式会社三菱総合研究所が原子力規制庁から受託した高経年化技術評価高度化事業「経年プラントの総合的な安全評価手法に係る調査研究」の再委託研究における成果の一部である。ここに記して謝意を表する。

## 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, H. Miyano, S. Arai et al.: “Resilience index for system safety assessment for nuclear power plant”, Proceedings of 2nd International Conference on Maintenance Science and Technology, Kobe, Japan, Nov. 2-5, p.21 (2014)
- [4] 出町和之, 鈴木正昭, 村上健太ら: “原子力プラントの事故時安全性評価指標としてのレジリエンス指標の提案”, 日本保全学会第12回学術講演会要旨集, 日立, 7月13-15日, pp.251-256 (2015)
- [5] K. Demachi, H. Miyano, S. Arai et al.: “Maintenance index for system safety assessment for aging nuclear power plant”, E-Journal of Advanced Maintenance, Vol.7, No.3, pp.199-205 (2015)
- [6] 日本原子力学会: “原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準: 2007”, 日本原子力学会標準, AESJ-SC-P006:2007 (2007)

(平成 27 年 11 月 2 日)