



# 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1：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)

Development of Resilience Evaluation Method for Nuclear Power Plant  
(Part 1: Proposal of Resilience Index for Assessment of Safety of  
Nuclear Power Plant under Severe Accident)

|                  |       |                    |            |
|------------------|-------|--------------------|------------|
| 東京大学             | 出町 和之 | Kazuyuki DEMACHI   | Member     |
| 東京大学             | 鈴木 正昭 | Masaaki SUZUKI     | Member     |
| 東京大学             | 糸井 達哉 | Tatsuya ITOI       | Member     |
| 東京大学             | 村上 健太 | Kenta MURAKAMI     | Member     |
| 東京大学             | 笠原 直人 | Naoto KASAHARA     | Non-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<br>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 |

In this research, a new index “The Resilience Index” was proposed to evaluate the capability of nuclear power plant to recover from the situation of safety function lost. Three elements assumed to evaluate the resilience index are the achievement rate, necessary time, and probability of success of each accident management activity. The resilience index is expected to visualize the improvement of safety of each nuclear power plant against severe accidents.

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

## 1. 緒言

福島第一発電所事故以降、原子力プラントにとっての事故時におけるアクシデントマネジメント(AM)の重要性、すなわちハザード等の原因により一時的に喪失した安全上重要な機能をいかに早く・いかに必要なレベルまで回復させられるかという能力の重要性が再認識された。

原子力プラントの AM 能力、すなわち安全機能回復能力を定量的に評価するには、単純に確率で評価するのではなく、事故シナリオに沿って時系列で AM をシミュレーションし、最終的に重大事故に至らないか否か、すなわち必要最小限の安全機能をタイムリミット内に回復できるか否かを評価する必要がある。

連絡先: 出町和之、〒113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1、  
東京大学大学院工学系研究科原子力専攻、  
E-mail: demachi@n.t.u-tokyo.ac.jp

今回のシリーズ論文では、日本保全学会・保全指標検討会が、原子力プラントの AM による安全機能回復能力を評価する指標として開発した「レジリエンス指標」[1]について、

- ・レジリエンス指標の基本的考え方
- ・静的機器の劣化要因に対する信頼性評価法
- ・PWR を例にした試評価
- ・運転プラントにおけるシステム安全の考え方の4段階に分けて、4件の論文にてそれぞれ解説する。

## 2. レジリエンス指標の基本的考え方

### 2.1 安全機能のレジリエンスとは

レジリエンスとは一般的に「復元力、回復力、弾力」などと訳される言葉である。では原子力安全におけるレ

レジリエンスとは何であろうか。ここではそれを、「ある要因により失われた減圧機能や冷却機能など安全機能を回復する能力」と考えることにする。

原子力プラントでは、例えば外力などを起因とする事故の発生により安全機能が一時的に失われた場合には、炉心損傷などのシビアアクシデントを避けるため、AMを展開して安全機能を回復させる。

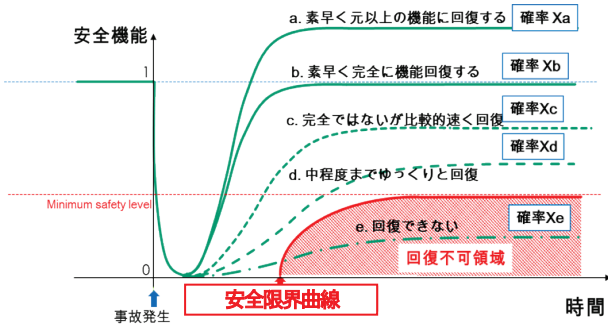


Fig. 1 Resilience of safety function

Fig.1 は、時刻  $t=0$  においてある安全機能が一時的に失われ、その後回復するという、a. ~ e.の AM シナリオの 5 つの例を示している。回復力が大きくて早ければ a. のようなシナリオになるであろう。一方で、回復力が小さくて遅ければ、e.に近いシナリオとなるであろう。e.は赤くハッチングした回復不可領域と交わっている。ここで考える回復不可領域とは、シビアアクシデントに至らないためのタイムリミットと最低限の機能回復度とで結ばれる領域である。この領域と交わる AM シナリオは、タイムリミットまでに最低限の安全機能を回復できなかったために「失敗」と判断できる。

逆に言うと、回復不可領域を避ける AM シナリオは「成功」となる。「成功」する AM シナリオを用いてレジリエンス指標、すなわち原子力プラントの AM 能力を定量化する手段はいくつか考えられるが、ここではまず、「成功」する確率、すなわち「回復不可領域を通らない AM シナリオの存在確率」について考える。

Fig.1 に示す各々のレジリエンスカーブの AM シナリオは、AM を構成する段階的対応の各々が持つ 3 つの特徴量により算出できると仮定する：

- ① 要求機能充足率  $\ell$  : 各対応が設計要求に比して機能する割合
- ② 必要経過時間  $\Delta T$  : 各対応の操作にかかる時間
- ③ 成功確率  $x$  : 各対応が行われ、かつ成功する確率

これら 3 つの特徴量を用いて、「回復不可領域を通らない AM シナリオの存在確率」を算出するための手法とその

考え方を次に述べる。

## 2.2 AMシナリオパスとレジリエンス指標

Fig.2 に例を示すように、AM は複数の対応が多段に組み込まれた構造をしている。すなわち、第 1 段階目の対策が失敗するかまたは十分に事故を収束できない場合には第 2 段階の対応が実施され、それが失敗するかまたは十分に事故を収束できない場合にはさらに第 3 段階の対応が実施される、という具合である。実際の AM はもっと複雑であるが、このように各段階の対応における前述の①~③を評価できれば、その組み合わせにより「回復不可領域を通らない AM シナリオの存在確率」を算出できるであろう。

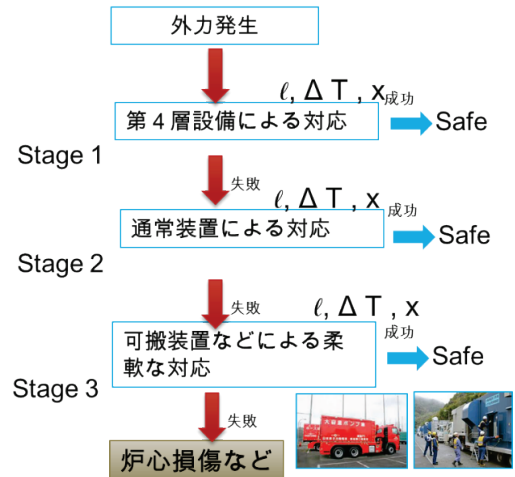


Fig. 2 Layered accident management

$\ell, \Delta T, x$  を用いて、Fig.2 の各 AM による安全機能回復の時間変化を表すと、Fig.3 のようになる。安全機能は時刻  $t=0$  において一時的に低下する。その後多段的な対応で構成される AM を展開するのであるが、第 1 段階の対応で十分に安全機能が元通りに回復するシナリオもあれば、いくつかの段階の対応を経なければ要求を満足するレベルまで安全機能が回復しないシナリオもあるだろう。また、各対応は外力（地震や津波など）の大きさの影響によっては対応能力そのものが低下する可能性もあり、その影響を受けたシナリオも考慮に入れる必要がある。

このように、ある安全機能喪失事象を想定し、次にその AM シナリオを展開し、その AM シナリオに沿って可能性のあるすべての AM パスについて安全機能回復の時間変化を折れ線グラフで表現することができれば、「回復不可領域を通らない」AM パスと「通る」AM パスとの

選別が可能となる。前者のみの AM パスの確率の和は、レジリエンス指標として定義した「回復不可領域を通らない AM シナリオの存在確率」に他ならない。

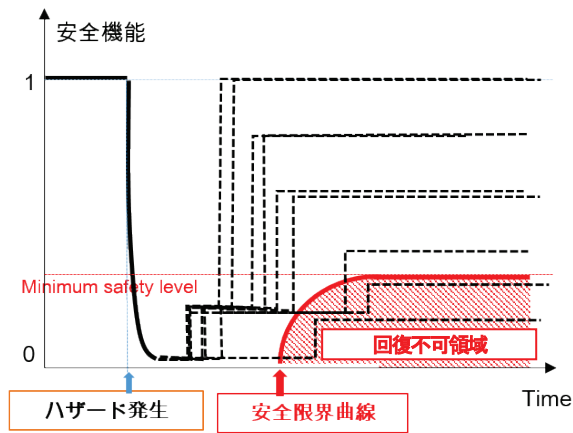


Fig. 3 Resilience index is obtained as the sum of probability of AM path that avoids the irrecoverable area.

### 2.3 レジリエンス指標に期待される有用性

レジリエンス指標の用途としてまず挙げられるのは、レジリエンス指標値をプラントごとに比較することで、各プラントの外力に対する AM 能力を比較評価できることである。

また、事業者によって AM 策の改善がなされた場合、これを Fig4 のように AM パスの上昇として可視化することができる。すなわち、AM 策の改善前後でその効果を可視化することができる点も、もう一つの用途として挙げられる。

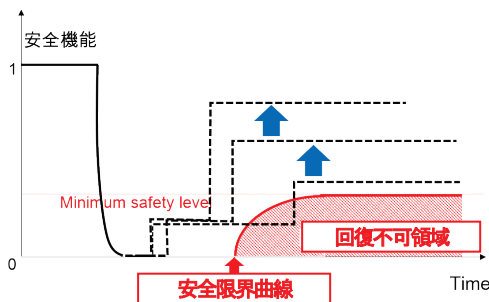


Fig. 4 Improvement of AM measure is visualized as the change of the AM management path.

## 3. レジリエンス指標の算出手順

レジリエンス指標値を算出するための手順は以下の通りである。

- ① 事故シーケンスを選択する。
- ② 選択したシーケンスに対して AM シナリオを展開する。
- ③ 特徴量 ( $l, \Delta T, x$ ) を AM シナリオの可能性のあるすべての AM パスについて評価する。
- ④ 特徴量 ( $l, \Delta T, x$ ) の外力強度依存性をモデル化する。
- ⑤ 外力の強度とその確率分布を設定する。
- ⑥ 回復不可領域を避ける AM シナリオの確率を積分し、レジリエンス指標値とする。

これら①～⑥について、以下に解説する。

### 3.1 事故シーケンスの選択

原子力規制委員会の審査ガイド「原子炉損傷防止対策及び格納容器機能喪失防止対策の有効性に係る標準評価手法」では、重大事故の兆候として最低限度想定しなければならない事故シーケンスが指定されている。BWR と PWR に関する「炉心の著しい損傷の防止」シーケンスは以下の通りである。レジリエンス指標の評価では、事故シーケンスとしてこれらを適用することとする。ここでは例として、BWR の「2) 高圧注水・減圧機能喪失」シーケンスを対象とした場合について述べる。

#### 炉心の著しい損傷の防止シーケンス (BWR)

- 1) 高圧・低圧注水機能喪失
- 2) 高圧注水・減圧機能喪失
- 3) 全交流電源喪失
- 4) 崩壊熱除去機能喪失
- 5) 原子炉停止機能喪失
- 6) LOCA 時注水機能喪失
- 7) 格納容器バイパス (インターフェイスシステム LOCA)

#### 炉心の著しい損傷の防止シーケンス (PWR)

- 1) 2 次冷却系からの除熱機能喪失
- 2) 全交流動力電源喪失
- 3) 原子炉補機冷却機能喪失
- 4) 原子炉格納容器の除熱機能喪失
- 5) 原子炉停止機能喪失
- 6) ECCS 注水機能喪失
- 7) ECCS 再循環機能喪失
- 8) 格納容器バイパス (インターフェイスシステム LOCA, 蒸気発生器伝熱管破損)

### 3.2 選択したシーケンスにAMシナリオを展開

Fig. 5 に「高圧注水・減圧機能喪失」シーケンスを対象に展開した AM シナリオの例を示す。第 1 段階の対応で AMADS(AM 時自動減圧系)が作動すれば原子炉内の圧力を下げられるが、これに失敗した場合には第 2 段階で SR 弁による逃し弁機能の投入で減圧を行う。減圧成功後は、次なる第 1 段階の対応として AMLPCI(AM 時低圧注水系)が作動すれば炉心に冷却水を注水でき、炉心損傷には至らない。AMLPCI が作動しない、もしくは十分に機能しない場合には、第 2 段階の対応として低圧 ECCS(緊急冷却装置)が自動もしくは手動で起動し、冷却水を注水する。それでも十分でない場合には、第 3 段階として MUW(復水補給水系)やポンプ車を投入して冷却水の注入を行う。

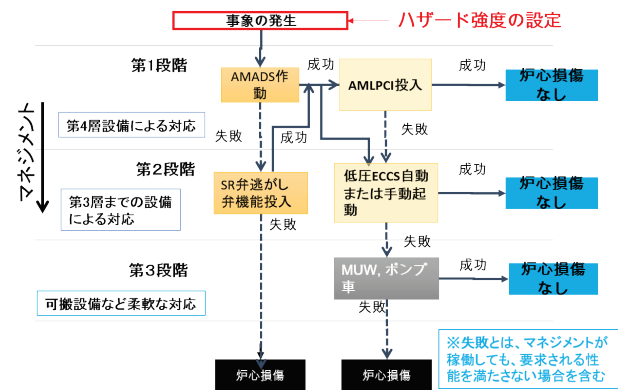


Fig. 5 Example of AM scenario for loss of high pressure cooling water injection function and loss of decompression function

### 3.3 特徴量 $l$ , $\Delta T$ , $x$ を各 AM シナリオの AM パスについて評価

Fig. 6 に、Fig. 5 で示した「高圧注水・減圧機能喪失」シーケンスを対象に展開した AM シナリオのうち、 $j = 1$  と  $j = 4$  の AM パスを示す。 $j = 1$  の AM パスでは、外力発生後にまず AMADS が対応して炉内圧力を低下させ、次に AMLPCI と低圧 ECCS が対応することで冷却水が注入され炉心冷却に至る。

$j = 1$  の AM パスを構成するこれら 3 つの対応のうち、AMADS による対応の成功確率を  $x_1(L)$ 、要求機能充足率を  $l_1(H)$ 、経過時間を  $\Delta T_1(H)$  とし、同様に AMLPCI と低圧 ECCS による対応の成功確率、要求機能充足率、経過時間を  $x_2(L)$ ,  $x_3(L)$ ,  $l_2(H)$ ,  $l_3(H)$ ,  $\Delta T_2(H)$ ,  $\Delta T_3(H)$  とする。ここで、 $L$  はこの AM パスによって回復したプラントの安全機能、 $H$  はハザードの強度である。また、仮に  $\Delta T_2(H) < \Delta T_3(H)$  とする。

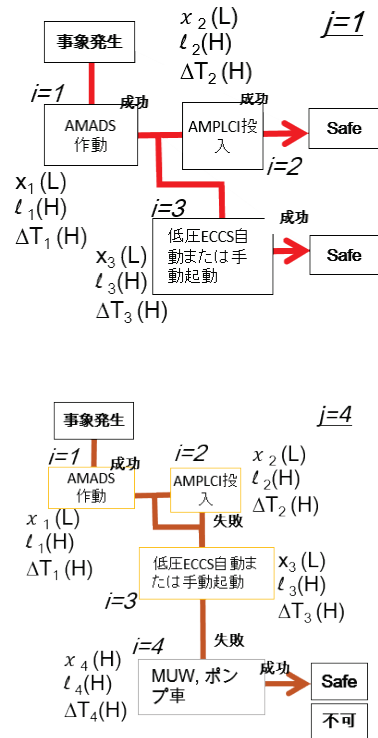


Fig. 6 Two AM paths for loss of high pressure cooling water injection function and loss of decompression function

外力  $H$  が小さい場合、 $l_1(H=小)=1$ ,  $l_2(H=小)=1$  であり、AMADS と AMLPCI が対応することで一時的に低下した安全機能は  $L = l_1 \times l_2 = 1$  までに時間  $T = \Delta T_1(H=小) + \Delta T_2(H=小)$  で回復する。また、この場合には  $L=1$  まで安全機能が回復できるため、この AM パスの存在確率は  $X = x_1(L=1) \times x_2(L=1)$  と求められる。これに基づく安全機能回復の時間変化を表すと、Fig. 7 の青実線のようなになる。

同じく  $j = 1$  の AM パスで外力  $H$  が大きい場合の安全機能回復の時間変化を表したものが Fig. 7 の青点線である。この AM パスでは  $l_1(H=大) < 1$ ,  $l_2(H=大) < 1$  であり、 $L = l_1 \times l_2 < 1$  となって安全機能は元の状態まで回復できるわけではないが、要求される回復を満足しているためにさらに次の段階の対応は不要とする。この AM パスで必要とされる時間は  $T = \Delta T_1(H=大) + \Delta T_2(H=大)$  であり、この AM パスの存在確率は  $X = x_1(L_1) \times x_2(L_1)$  と求められる。

同様に、 $j = 4$  の AM パスについて考える。外力発生後、AMADS の対応は成功するが、第 1 段階の AMLPCI および第 2 段階の ECCS の対応の作動に失敗するか、または作動できても安全機能回復が要求されるレベルに達せず、第 3 段階の MUW やポンプ車を投入して冷却水を注入することによって要求レベルを充足する。MUW とポンプ車による対応の成功確率と要求機能充足率と経過

時間を  $x_4(L)$ ,  $\ell_4(H)$ ,  $\Delta T_4(H)$  とすると、 $j=4$  の AM パスで回復する安全機能は  $L_4 = \ell_1(H=大) \times \ell_2(H=大) + \ell_1(H=大) \times \ell_3(H=大) + \ell_1(H=大) \times \ell_4(H=大)$ , 経過時間は  $T = \Delta T_1(H=大) + \Delta T_2(H=大) + \Delta T_3(H=大) + \Delta T_4(H=大)$ , AM パスの存在確率は  $X = x_1(L_4) \times (1-x_2(L_4)) \times (1-x_3(L_4)) \times x_4(L_4)$  と求められる。しかしこの  $j=4$  の AM パスは、Fig. 7 に示すように制限時間内に安全機能の回復が間に合わず、「回復不可領域」と交差してしまう。よって  $j=4$  の AM パスは、最終的な安全機能回復度は要求レベルを充足するものの、「失敗 AM パス」として判定される。

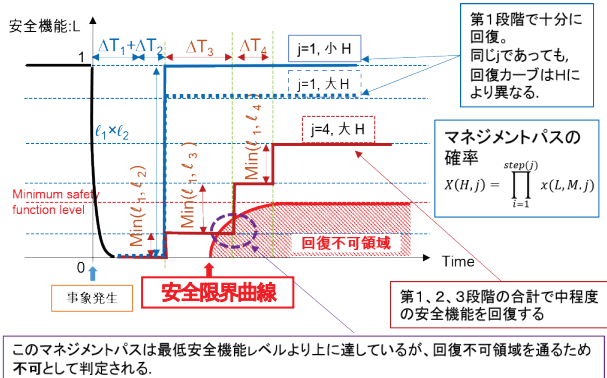


Fig. 7 Probability of hazard strength and corresponding AM scenario paths

### 3.4 特徴量 $\ell$ , $\Delta T$ , $x$ の外力強度依存性モデル

上述のようにレジリエンス指標では、AM 対応の成功確率  $x(L)$ , 要求機能充足率  $\ell(H)$ , 経過時間  $\Delta T(H)$  を用いて AM パスの安全機能回復能力を評価する。ここでは  $x(L)$ ,  $\ell(H)$ ,  $\Delta T(H)$  の外力強度  $H$  への依存性のモデル化について説明する。

#### (1) 要求機能充足率 $\ell(H)$

各 AM 対応に対し、外力閾値  $C_1, C_2$  を定める。外力の影響がないときは機能が完全に作動し、安全機能回復への寄与は最大となると考えられ、 $\ell(H) = 1$  となる。外力強度  $H$  が大きくなり  $C_1$  を超えると、 $C_1$  から  $C_2$  に至る間に安全機能回復への寄与は直線的に減少し、 $C_2$  で 0 に達する。 $H > C_2$  では  $\ell(H) = 0$  である。

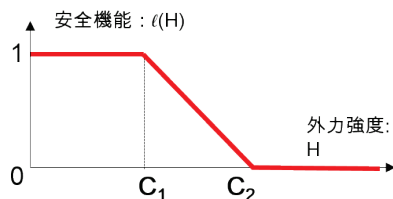


Fig.8 Dependency model of sufficiency rate of required performance of AM action upon the strength of hazard (H)

#### (2) 経過時間 $\Delta T(H)$

各 AM 対応に対し、要求機能充足率  $\ell(H)$  と同じく外力閾値  $C_1, C_2$  を定める。外力の影響がないときの経過時間はその対応における設計値  $T_1$  と等しく  $\Delta T(H) = T_1$  となる。外力強度  $H$  が大きくなり  $C_2$  を超えると、この対応は作動することができず次の段階の AM に移る。

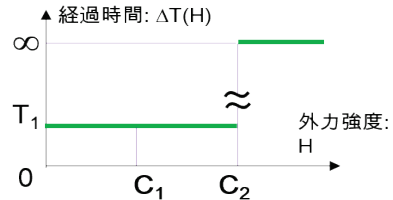


Fig.9 Dependency model of necessary time of AM action upon the strength of hazard (H)

#### (3) 確率 $x(L)$

ここでは、「成功」、「失敗」、「不要」の3つの場合の確率を定義する。このうち「不要」とは、当該の前の段階の対応までの和として安全機能回復 ( $=L$ ) が要求を満足しており ( $L > L_c$ )、当該の対応が行われない場合に相当する。したがって、 $L > L_c$  であれば  $x(L) = 0$  となる。

一方、「成功」、「失敗」は、当該の前の段階の対応までで安全機能回復が要求を満足しておらず ( $L < L_c$ )、よって当該の段階の対応を行う必要がある場合に考慮する。さらにここで言う「成功」、「失敗」は、外力による影響を受けないものとする。外力による影響は要求機能充足率  $\ell(H)$  ですでに考慮済みであるためである。したがって、外力の影響を受ける以前の状態で、偶発故障や劣化により AM 対応が作動しない場合が「失敗」であり、作動する場合が「成功」である。各々の確率は、 $x(L) = M$  および  $x(L) = 1 - M$  である。ここで  $M$  は「保全指標値」[2]であり、保全指標検討会にて提案した、偶発故障や劣化と保全による回復の効果を考慮に入れて機器・構造物の未来の機能喪失確率を定量的に評価する指標である。以上、「成功」・「失敗」・「不要」の確率は、前段階までの安全機能回復 ( $=L$ )、要求される安全機能回復 ( $=L_c$ )、保全指標値 ( $=M$ ) を用いて、Fig.10 のように表される。

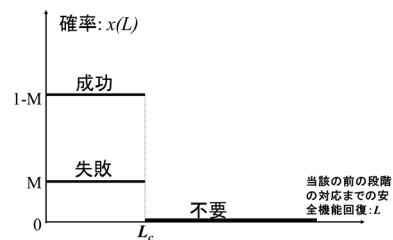


Fig. 10 Dependency model of success probability of AM action upon the recovered safety function of plant (L)

### 3.5 外力の強度とその確率分布の設定

つぎに、外力（ハザード）の強度  $H$  によって各 AM 対応の能力が低下することを考慮に入れる。このため外力の発生確率を、Fig. 11 のように外力強度を変数として設定する。グラフの縦軸の値は、ハザード強度= $H$  のハザードが発生する確率である。この値は、そのハザードのために各アクシデントマネジメントパスが対応する確率の和に等しい。図中の領域は、対応するマネジメントパスを意味する（青： $j=1$ 、緑： $j=2$ 、黄： $j=4$ ）。

Fig. 11 にて色分けしたように、外力の影響が無い ( $H=0$ ) の場合には、 $j=1$  のパスに示す第1段階の対応で安全機能を回復する確率が圧倒的に高いであろう。一方、 $H$  が大きくなると、第1段階の対応だけでは安全機能を回復しきれず、第2、第3段階の対応の投入も必要とする  $j=2, 3, 4, 5...$  のパスの割合が増えると考えられる。

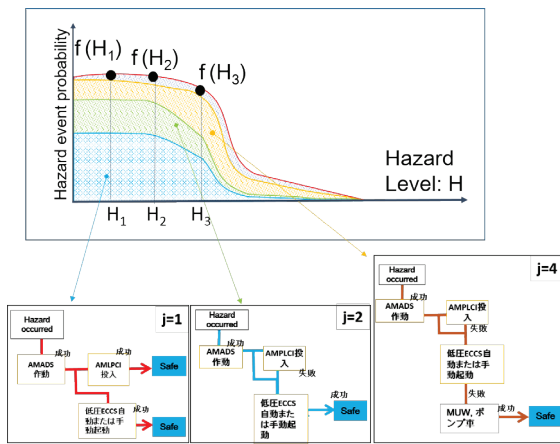


Fig. 11 Probability of hazard event due to hazard strength

### 3.6 レジリエンス指標値の算出

以上のモデルを用いて求められる AM パスの時間変化を用い、レジリエンス指標値を算出する。まず Fig. 12 のように回復不可領域（Un-recoverable area）に交わらない AM パスを抽出できる。ここで  $\delta(j, H)$  を、 $j$  番目のパスが外力強度  $H$  の影響を受けるときに回復不可領域を通るか否かの 0 or 1 のインデックスとして定義すると、レジリエンス指標値は

$$I = \int_0^{\infty} \sum_j \delta(j, H) x(j, H) f(H) dH \quad (1)$$

の式で表わされる。ここで  $f(H)$  は Fig. 11 に示した外力強度  $H$  のハザードの発生確率、 $x(j, H)$  は、外力強度 =  $H$  のときの  $j$  番目 AM パスの存在確率である。

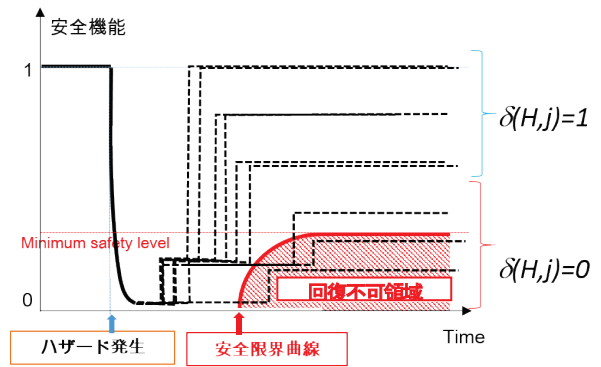


Fig. 12 Calculation of resilience Index value from AM paths

## 4. 結論

原子力発電所の AM 能力を、AM シナリオの 3 つの特徴量 ( $\ell, \Delta T, x$ ) に基づき、さらに外力強度と保全活動の効果を考慮して評価する「レジリエンス指標」を提案した。現提案での「レジリエンス指標」はまだ簡易手法であるが、細部を精緻化することによりさらに精密な評価が可能になると考える。

## 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。

## 参考文献

- [1] 原子力規制庁委託事業・平成26年度高経年化技術評価高度化事業、「経年プラントの安全評価指標と評価データの枠組みに関する調査」成果報告書
- [2] 原子力規制庁委託事業・平成25年度高経年化技術評価高度化事業、「経年プラントの安全評価指標と評価データの枠組みに関する調査」成果報告書

(平成27年10月27日)