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

Proposal of Resilience Index for Assessment Index 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	Non-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
原子力安全システム研究所	釜谷　昌幸	Masayuki KAMAYA	Member
日本保全学会	山口　篤範	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 reliability of system safety of nuclear power plant under severe accident by considering the capability to recover from the situation the system safety function was lost. Three elements were 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 Index, Safety Assessment, Severe Accident, Accident Management, and System Safety

１．研究の背景

従来の原子力プラントの安全性評価はプラント建設時の個々の機器の信頼性評価とほぼ同義であった。しかしながら、プラントの安全性を保つためには、個々の機器の信頼性の評価にとどまるのではなく、その機器によって構成される系統（システム）の機能の信頼性をこそ評価する必要がある。

安全上重要な機能には、バウンダリ機能、冷却機能、制御機能の３つがあり、またそれらをサポートする電源などの共通機能も重要な要素である。これらの機能を確保することで、プラントとしてのシステム安全が確保される。

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

福島第一原子力発電所事故以降、事故時における原子力発電所の安全機能の回復には、アクシデントマネジメント（AM）が重要であることが認識された。事故時に重要なのは、AMによって、一時的に喪失した安全機能をいかに「早く・必要なレベルまで回復できるか」である。ここでは、日本保全学会・保全指標検討会が、原子力プラントの事故時におけるシステム安全機能の回復能力を簡易的かつ定量的に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、その考え方を解説する。

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。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、AMを展開し、その一時的に失われた安全機能を回復して炉心損傷などのシビアアクシデントを避けるための対応を行う。

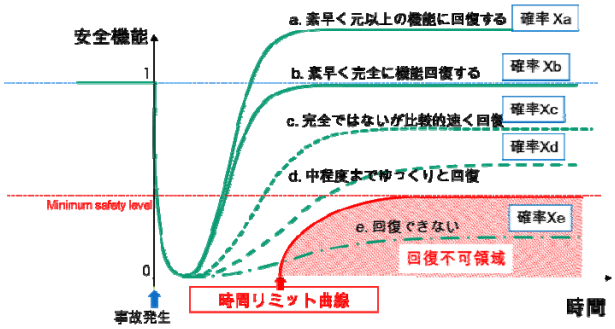

Fig.1 Resilience of Safety Function

Fig. 1 は、時刻 t=0 においてある安全機能が失われ（1→0 ）、その後に上昇するという、a～e のAMシナリオの例を５つ示している。外力の影響が小さく、また回復力が大きければ a. に近いシナリオになるであろう。一方で、外力の影響が大きく、回復力が小さければ、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に交わっている。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量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「AM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「AM成功」となる。したがってここではレジリエンス指標の定義を、この「AM成功」の確率、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」として定義する。さらには、レジリエンス指標とはプラントのシビアアクシデントに対する「耐力」を評価する指標でもあると言うこともできる。

Fig. 1 に示す各々のレジリエンスカーブのAMシナリオは、各AMの持つ３つの特徴量によりあらわすことができると仮定する：

① 要求機能充足率 ℓ：そのAMがどの程度、設計された通りに機能するか
② 必要経過時間 ΔT：そのAMの操作にどの位の時間がかかるか
③ 成功確率 x：そのAMが実施され、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．レジリエンスの評価手法

Fig. 2 に例を示すように、AMは複数の対策が多段的に組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でなく事象が収束できない場合には第２段階の対策が実施され、それが失敗するかまたは十分でなく事象が収束できない場合にはさらに第３段階の対策が実施される、という具合である。

実際のAMはFig. 2 の例に示すよりも複雑であるが、このように各段階の対策における前述の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。

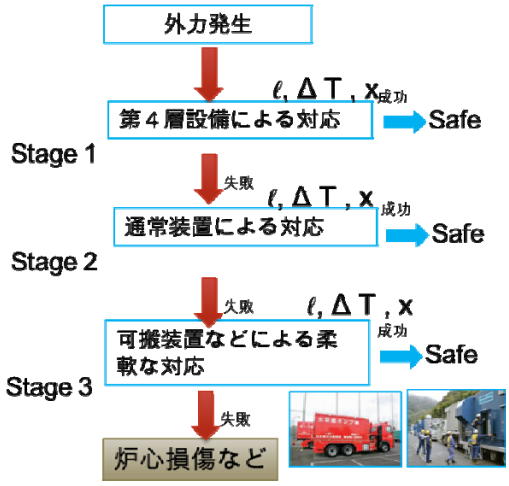

Fig.2 Layered Accident Management

ℓ, ΔT, x を用いて、Fig. 2 の各AMマネジメントパス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 $t=0$ において一時的に安全機能を喪失した状態まで落ちる。その後に多段的な対策から構成されるAMマネジメントを展開するのであるが、第１段階の対策で十分に安全機能が元通りに回復するパスもあれば、いくつかの段階の対策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パスもあるだろう。また、各対策は外力（地震や津波など）の大きさの影響によっては対策能力そのものが低下する可能性もあり、その影響を受けたパス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」パスと「通る」パスとの選別が可能となる。前者のみのパスの確率の和は、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。

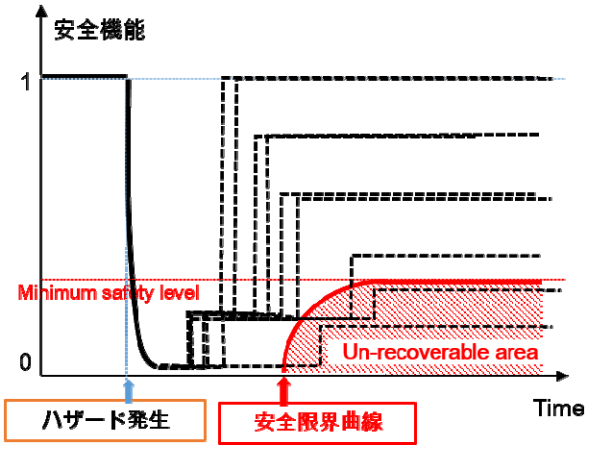

Fig.3 Resilience Index is obtained as the sum of probability of AM path that avoids the Un-recoverable area.

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使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、AMシナリオパスは Fig. 4 のように安全機能回復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使途として挙げられる。

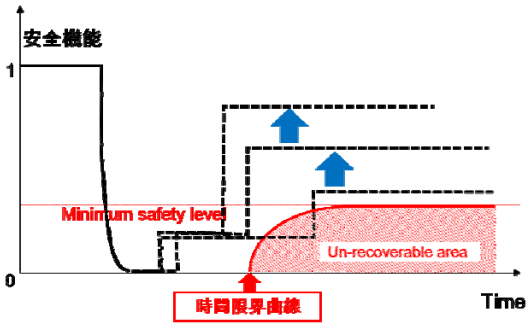

Fig.4 Improvement of AM Measure is visualized as the change of the AM management path.

4．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ついてAMシナリオを展開する。
③ 特徴量（ℓ，ΔT，x）を各AMシナリオのパスについて評価する。
④ 特徴量 ℓ，ΔT，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シナリオパスの確率を積分し、レジリエンス指標値とする。

以下に、これら①～⑥について説明する。

4.1 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、「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。

<u>炉心の著しい損傷の防止シーケンス（BWR）</u>

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）

<u>炉心の著しい損傷の防止シーケンス（PWR）</u>

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）

4.2 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AMでAMADS 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 段階のマネジメントとして AMLPCI 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 段階のマネジメントとして低圧 ECCS 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。

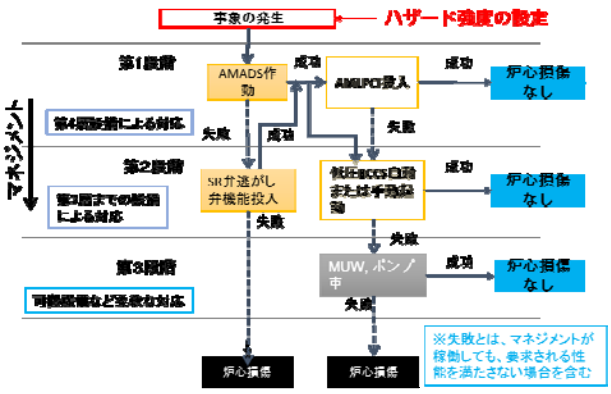

Fig.5 Example of AM scenario for Loss of High Pressure Cooling Water Injection Function and Loss of Decompression Function

4.3 特徴量 ℓ, Δ T , x を各AMシナリオのパスについて評価

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 が作動して炉内圧力を低下させ、次に AMLPCI と低圧 ECCS が作動することで冷却水が注入され炉心冷却に至る。すなわち「高圧注水・減圧機能喪失」の回復である。

j=1 のAMパスを構成するこれら 3 つのマネジメントアクションのうち、AMADS 作動の成功確率を 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 の作動成功確率と要求機能充足率と経過時間を 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パスによって回復する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。

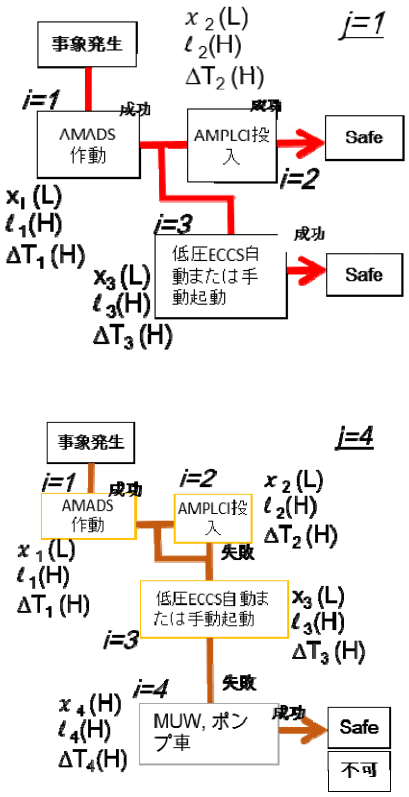

Fig.6 Two AM scenario paths for Loss of High Pressure Cooling Water Injection Function and Loss of Decompression Function

ハザードの影響が小さい場合、$\ell_1(H=小)=1$, $\ell_2(H=小)=1$ であり、AMADS と AMLPCI が作動することで一時的にゼロまで低下した安全機能は $L = \ell_1 \times \ell_2 = 1$ 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パスの確率は $x_1(L=1) \times x_2(L=1)$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 の青実線のようになる。

同じく j=1 のAMパスでハザードの影響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。ハザードの影響により $\ell_1(H=大)<1$, $\ell_2(H=大)<1$ であり、このAMパスで安全機能回復度は$L_1 = \ell_1 \times \ell_2 < 1$ となる。完全に元通りの状態まで安全機能を回復できるわけではないが、要求されるレベルを満足しているために次の段階のマネジメントは不要とし、ここでアクシデントマネジメントは完了する。このAMパスで必要とする経過時間は $T = \Delta T_1(H=大) + \Delta T_2(H=大)$であり、

このAMパスの確率は$x_1(L_1)\times x_2(L_1)$と求められる。

同様にして、$j=4$ のAMパスについて考える。外力発生後、AMADS の作動は成功するが、第 1 段階の AMLPCI および第２段階の ECCS の作動が失敗するかまたはこれらのみでは安全機能回復が要求レベルに達せず、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安全機能が要求レベルを充足する。ここで「失敗」とは、マネジメントが稼働しても、要求される性能を満たさない場合を含む。MUW とポンプ車の作動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パスの確率は $x_1(L_4)\times(1-x_2(L_4))\times(1-x_3(L_4))\times x_4(L_4)$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」と交わっている。この場合、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。

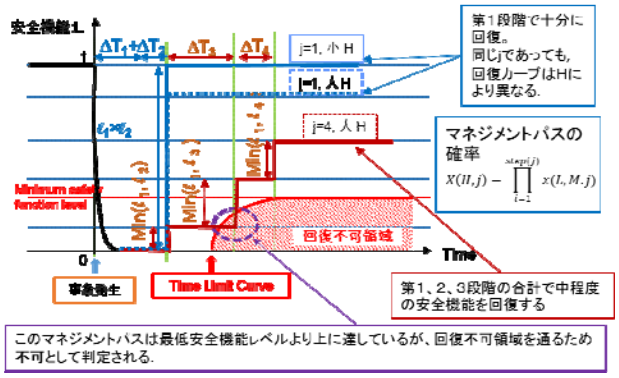

Fig.7 Probability of Hazard Strength and corresponding AM scenario paths

4.4 特徴量 ℓ, Δ 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の成功確率を $x(L)$, 要求機能充足率を $\ell(H)$, 経過時間を $\Delta T(H)$として、各々のAMパスを評価する。ここではその各々の外力強度Hに対する依存性のモデル化について説明する。

i) 要求機能充足率 $\ell(H)$

各AM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。外力の影響が大きくなり 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に落ちる。$H>C_2$ では$\ell(H)=0$ である。

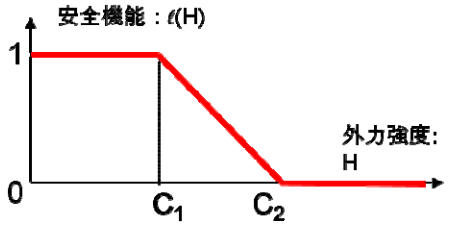

Fig.8 Dependency model of sufficiency rate of required performance of AM action upon the strength of hazard (H)

ii）経過時間 $\Delta T(H)$

各AM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AMの設計値（設定値）と等しくなり、$\Delta T(H)=T_1$ となる。外力の影響が大きくなり C_2 を超えると、このAMは稼働することができず次の段階のAMを開始する。T_1 は各マネジメントの能力により決まる。

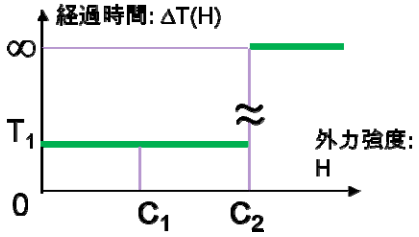

Fig.9 Dependency model of necessary time of AM action upon the strength of hazard (H)

iii）成功確率 $x(L)$

ここで言う「成功」とは、当該のマネジメントまでで、全体の安全機能回復（＝L）が、要求を満足（$L>L_c$）しており、さらなる段階のマネジメントを行う必要がない場合を指す。すなわち「成功」or「失敗」はその時点での安全機能回復(=L)によって判断される。「成功」＝そのAMが実施されてかつ成功する確率が $x(L)$,「失敗」＝その機能が実施されないか、または実施されても失敗する確率が $1-x(L)$となる。

$L<L_c$のとき $x(L)=M$, $L>L_c$のとき $x(L)=0$ とした。M とは、「保全指標値」[2]として定義される値であり、偶発故障や劣化によるAMの機能喪失確率に相当する。

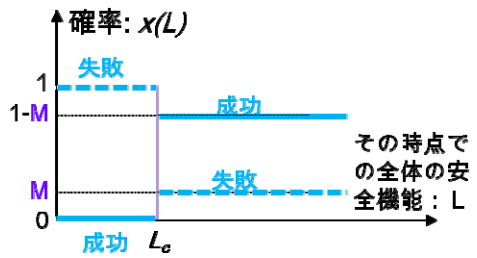

Fig.10 Dependency model of success probability of AM action upon the recovered safety function of plant (L)

4.5 外力の強度とその確率分布の設定

つぎに、外力（ハザード）の強度によって各々のアクシデントマネジメント活動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 のようにハザード強度を変数として設定しておく必要がある。

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 のパスで示す第 1 段階目のマネジメントで事象が収束する可能性が圧倒的に高いであろう。ハザードの強度が大きくなるにつれ、その発生確率自体は減少するものの、第 2、第 3 段階のマネジメント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。

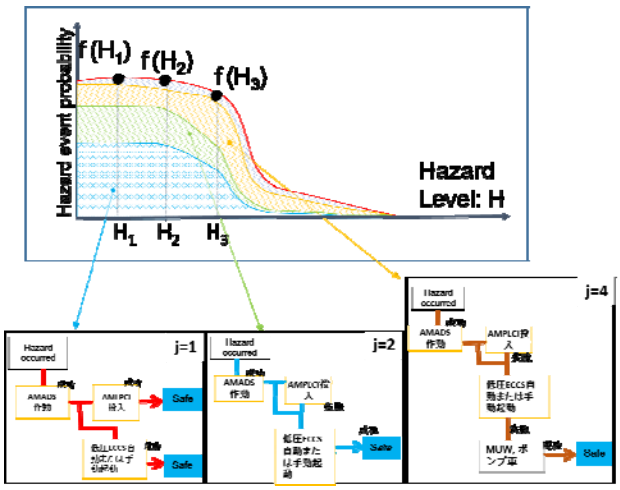

Fig.11 Probability of hazard event due to hazard strength

4.6 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

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

の式で表わすことができる。ここで $f(H)$は外力強度 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パスの確率である。

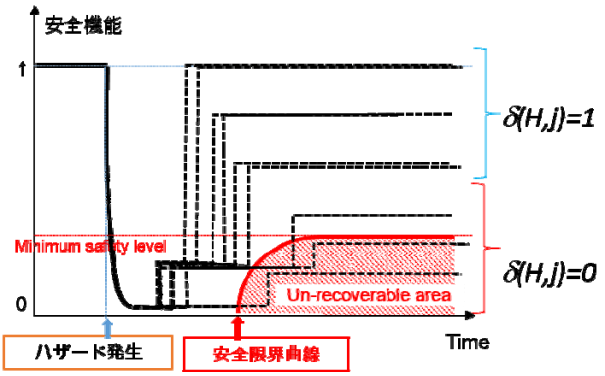

Fig.12 Calculation of Resilience Index Value from AM paths

5．結論

原子力発電所のAMのレジリエンス能力を外力強度の影響を考慮に入れて評価するための基礎的手法を提案し、レジリエンス指標と名付けた。今回のレジリエンス指標は簡易的手法であるが、細部を精緻化することにより、より正確がAM能力の評価が可能になると考える。今後は例えばストレステスト結果との比較などにより、レジリエンス指標の有効性・有用性の検証を試みる。

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