複数基立地サイトのリスクに対する考察 —確率論的リスク評価の観点での定性的な分析—

電力中央研究所 三浦 弘道

多くの原子力発電所では複数の原子炉施設を有するものの、確率論的リスク評価(PRA)では単一の原子炉を対象とした評価がなされており、複数基同時発災の文脈は明示的には考慮されていない。現在、国際的にも複数基立地サイトのリスクについて関心が高まっており、マルチユニット PRA 手法の開発や実施が進められている。本稿では、福島第一原子力発電所事故事例から複数基同時発災時の事故の様相を整理し、複数基立地サイトでのリスク値への影響について、起因事象発生頻度、事故緩和対応の失敗確率および影響度合いの観点から定性的な分析を行った。

KEYWORDS: *Site Risk, Multi-unit Site, Multi-unit PRA*

I. はじめに

多くの原子力発電所では、複数の原子炉施設を有するものの、現状なされている安全評価では単一の原子炉を対象とした評価が実施されている。確率論的リスク評価(PRA)を規制活動に用いている米国においても、リスクを考慮した決定を行う際には、原子炉毎のリスクを考慮することが慣行である。一方で、福島第一原子力発電所事故(以下、「1F 事故」という。)や小型モジュール型炉の開発等により、複数の原子炉を有する原子力発電所に対する安全性について、国際的に関心が高まっている¹⁾。

複数原子炉の安全性評価手法の一つとしてのマルチユニット(以下、「MU」という。)PRA 手法について国際的な研究開発が進められている。MUPRA は、1983 年の Seabrook 原子力発電所における評価にはじまり²⁾、その後いくつかの実施例があるものの、仮想的なプラントの評価であったり、技術的制約による簡略化であったりするのが現状であり、定量的な傾向を把握できる程度までには知見が蓄積されていない。また、これらの知見の蓄積が進まないのは、複数基立地サイトのリスクが、構造物、系統および機器(SSC)の共有状況や原子炉のサイト内の配置、ハザード特性等の立地条件の影響を受け、それら相互の関係がサイト固有であり、複雑であるためと考えられる。

Considerations for the Risk of Site with multiple units :
Hiromichi Miura.

(2020 年 9 月 7 日 受理)

前述のとおり現状では複数基立地サイトの現実に近い形での定量的な議論は難しいものの、複数基立地によるリスクへの影響はサイトの安全性を考える上では避けては通れない重要な関心事であると考えられる。そこで、本稿では PRA の評価体系に沿って、複数基立地サイトにおけるリスク値への影響について定性的に考えてみたい。Ⅱ章では単基を対象としている現状の PRA について概説し、Ⅲ章では複数基立地サイトにおけるリスク指標について概説する。Ⅳ章では 1F 事故の事例の分析を通して複数基立地サイト特有のリスク要因について整理し、Ⅴ章では複数基立地であることがリスク値にどのように影響するのかについて考察する。

Ⅱ. 確率論的リスク評価の概要

一般に原子力発電所の PRA は、原子力のエネルギー利用に係るリスクのうち、公衆や環境に電離放射線が与える影響を表す放射線リスク(原子力安全のリスク)を対象とし、それに関連するあらゆる事象・事故シナリオについて、それらの発生可能性(確率または頻度)と、発生した場合の影響度合いとを定量的に評価する手法である。

原子炉設備での、炉心損傷に進展し得るさまざまな擾乱(起因事象)に対して、事象を緩和する方策の成否あるいは付随して発生する事象の有無を網羅的に事故シナリオとして展開する。展開したそれぞれの事故シナリオに対して、終状態、すなわち、事象終息・炉心損傷や核分裂生成物(FP)の環境への放出の有無等で分類し、それぞれの事故シナリオの発生頻度を計算する。特に FP の

環境への放出を引き起こす事故シナリオについては、その放出タイミングや放出量、拡散や沈着、食物等への移行を計算し、これに基づき、放射線による健康影響を評価する。

厳密性を欠いた表現となるが、平易に表すと以下のとおり表現できる。

原子炉安全に関するリスク

$$= \sum_i (\text{事故シナリオ}i\text{の発生頻度}) \times \text{事故シナリオ}i\text{の(健康)影響}$$

↑

$$\{ \text{起因事象の発生頻度} \} \times \left\{ \begin{array}{l} \text{事故シナリオ}i\text{に至る緩和系の失敗} \\ \text{(あるいは事象発生)の組合せの発生確率} \end{array} \right\}$$

原子力発電所では、「止める、冷やす、閉じ込める」の安全機能毎に事故緩和策が多重化・多様化されていることから、起因事象が発生したとしても必ずしも炉心損傷に至るわけではなく、事故緩和策が失敗して炉心損傷に至るシナリオはある発生確率を持つ。そのような事故緩和策の失敗確率を評価するために、機器の故障や操作の失敗といった安全機能の機能喪失要因を組み合わせたロジックモデルが用いられる。

現状のPRAでは、発端となる起因事象の要因であるハザード毎に評価が行われる。ハザードはその発生場所により内部ハザードと外部ハザードに大別され、内部ハザードは機器の偶発故障や人的過誤、内部火災や内部溢水等の内的事象からなり、外部ハザードは、地震や津波、外部火災等の外的事象からなる。

PRAにおいて公衆の健康影響のリスク評価まで行うことは大変な労力を要することから、炉心損傷頻度(CDF)、格納容器機能喪失頻度(CFF)、大規模放出頻度(LRF)といった評価の中間段階でリスク指標を設定している。PRAから得られるリスク情報を活用した意思決定活動においては、これらの指標が判断材料に用いられる。現状、これらの指標の算出にあたり、学会のPRA標準類では複数基の影響を考慮することに言及はしているものの、評価対象自体は単一の原子炉であり、そのため、これらリスク指標の単位は単位年あたりに1つの原子炉で当該事象が発生する頻度、すなわち【/炉年】となっている。

PRAを実施する目的は、これらリスク指標の数値を得るだけでなく、発生頻度の高い事故シナリオの同定、機器故障や人的過誤といった事象の相対的なリスク重要度の決定等のリスク情報を得ることである。これらの情報は原子炉の脆弱点や安全性向上策の検討・分析に資するものであり、リスク指標と同様に重要な情報である。これらの情報を正確に得るためには、現状のプラント構成が正確にモデル化されているだけでなく、事故時のプラント応答が過度に保守的でなく現実的に評価され、事故シナリオやそれらの背後要因が網羅的に考慮されることが重要である。

Ⅲ. 複数基立地サイトに係るリスク指標

IAEAのリスク統合に関する議論³⁾においては、従来のような単基の原子炉に対するリスク指標では不十分であるとし、マルチソースリスクを表すための指標として、以下の指標を例示している。

- ・サイト炉心損傷頻度(SCDF)
- ・マルチユニット炉心損傷頻度(MUCDF)
- ・サイト燃料損傷頻度(SFDF)
- ・マルチソース燃料損傷頻度(MSFDF)
- ・サイト大規模放出頻度(SLRF)
- ・サイト早期大規模放出頻度(SLERF)
- ・サイト放出カテゴリ頻度(SRCF)。

いずれも単位は【/サイト年】となる。

複数の原子炉での事故シナリオ内で発生する事象が原子炉間で共通であったり、事象間で従属性、共通原因性や因果関係を有していたりするために、Seabrook原子力発電所におけるMUPRAからの知見としてFleming²⁾も複数基立地サイトにおけるサイトのリスク評価において、単基および複数基からの寄与を結合するためのリスク指標の単位は【/サイト年】ベースにすべきであるとしている。また、単基でのPRAから得られたCDFやLRF等のリスク指標を細工しても複数基立地サイトのリスク指標やリスク情報を得ることはできないとも述べている。

そこで、複数基立地サイトのリスクについて考える際には、事象が共通か、事象間にどのような従属性があるのかを分析することが肝要であろう。

Ⅳ. 複数基同時発災の影響

本章では、2011年3月に発生した1F事故の進展を参考に、複数基立地サイトでの同時発災事故がどのような様相を呈し得るかを考えてみたい。なお、本議論で、1Fが重大事故に至った主要因が複数基立地サイトに拠るということを主張する意図はないことに留意いただきたい。

1F事故発生の直接的要因は、地震およびその後の津波により引き起こされた。すなわち、地震と津波の影響により、非常用ディーゼル発電設備、非常用海水系設備や非常用メタクラ・パワーセンター等、原子炉設備間で同様あるいは近接配置の設備が同一の要因により機能喪失し、また外部電源送電網や開閉所等の原子炉設備間での共用されている設備が機能喪失した。このように、機器の共通要因による機能喪失あるいは共用設備の機能喪失と(特に外部ハザード下では、)原子炉設備間で独立でない事象が発生することが判る。

次に、福島第一原子力発電所1号機から4号機における事故進展を振り返る⁴⁾。地震発生後、出力運転中の1号機から3号機においてはスクラムに成功したものの、

外部交流電源喪失が発生し、非常用ディーゼル発電機が成功裡に起動し、炉心冷却が開始された。その後、津波の襲来により、全電源喪失(3号機は全交流電源喪失)に至り、1号機については3月11日中に炉心損傷、翌12日に原子炉建屋において水素爆発が発生、3号機については、初期には高圧系が機能していたものの、13日に停止して炉心損傷し、翌14日に原子炉建屋において水素爆発が発生、2号機については、14日に炉心損傷、翌15日に放射性物質が大量放出した。一方、4号機にあっては停止中であり、4号機自体の燃料は損傷していなかったものの、3号機からの水素流入により建屋において水素爆発が発生した。

この間、1号機の水素爆発飛散物による2号機-電源車間のケーブルの損傷、3号機水素爆発による2号機のサブプレッション・チャンバーからのベントラインにある空気作動弁の電磁弁励磁用回路の閉、3号機の水素爆発による3号機のタービン建屋前の逆流弁ピット内およびその周辺での高線量瓦礫の散乱による取水作業中断等、他号機の事象により直接的に事故緩和策に障害の発生が確認された。また、津波による故障、漂流物による移動制限、水素爆発による損傷、所外の道路ネットワークの輸送能力低下による消防車(可搬型注水設備)の不足、1、2号機の計器復旧等への対応による3号機の主蒸気逃し弁手動開のためのバッテリーの不足、同時発災に対応する上での運転員の不足等、複数基同時発災による冷却水、可搬型設備、人的リソース等の取り合い・不足が発生した。各原子炉設備で並列して事故が進展しつつも、近接原子炉での炉心損傷や水素爆発等の事象が、事故の緩和・操作の障害となっていたことが判る。

また、サイト内の複数基において全交流電源喪失が発生しプラント状態に関する情報が入り乱れたことにより、発電所対策本部での1号機非常用復水器の作動状況の誤認、事故初期の原子炉設備の深刻度判断の誤りによる2号機への注視、3号機高圧注水系の設備保全のための手動停止に関する情報把握の遅延、4号機原子炉建屋水素爆発時の4号機燃料の状態の誤認等、複数基同時発災への対応により状況評価や事故終息プラン策定において困難な状況が発生し、事故緩和に影響を及ぼした。

なお、ここまで複数基サイトのマイナス面を述べてきたが、5号機においては全交流電源喪失したが6号機の非常用ディーゼル発電機が一台健全であったために、タイラインを用いて6号機から5号機に電源融通を行い、RHRを機能させたといったプラス面の事例があったことについて付記しておきたい。

以上を整理すると、複数基立地サイトでの同時発災影響を評価する上で考慮する事項としては、以下が考えられる。

- (1)SSCの共有・相互接続
- (2)損傷・機能喪失要因の同一性

- (3)他原子炉設備の事故進展による緩和対応への影響
近接原子炉設備からのFP放出や水素爆発
資機材・要員等リソースの分配
- (4)複数基事故対応に伴う状況把握や緩和対応戦略の
困難化
- (5)号機間での資機材・要員等リソースの融通

V. 複数基立地サイトのリスク

複数基立地サイトのリスクを考えるにあたっては、IV章で示した考慮事項により単基におけるリスクがどのように変化していくのか見ていくことになる。

前述のとおり、リスクは事象の発生可能性(頻度)とその影響度の積で表される。さらに、事象の発生可能性(炉心損傷頻度等)は、起因事象の発生頻度と事故緩和・操作の失敗確率(条件付炉心損傷確率等)の積で表される。厳密には単純な掛算とはならないが、ここでは議論をし易くするために、単純化して考える。この考え方を図示すると、図1のように表せる。x軸に起因事象の発生頻度、y軸に事故緩和・操作の失敗確率、z軸に影響度をとると、事象の発生可能性は起因事象発生確率と事故緩和・操作の失敗確率との積であるので、x-y平面での面積、リスクは事象の発生可能性と影響度との積であるので直方体の体積として表せる。

複数基立地サイトであることによりリスク値がどのように変わるのかを考える際には、IV章で示した考慮事項によりこの3軸の値がどのように変化するかを別個に考えることが理解の助けになるだろう。

図2では、例として同一サイト内に2基の原子炉設備

図1 リスクのイメージ

図2 2基の場合のリスクのイメージ

が存在する場合のリスクのイメージを示す。このとき、起因事象の発生状況(単基での発生か、複数基での発生か)、終状態への到達状況(炉心損傷や放射性物質の望ましくない状態が単基で発生か、複数基で発生か)について分けて考える。起因事象が発生しないと炉心損傷や放射性物質の放出等望ましくない状態は起こり得ない。一方で起因事象が発生したからといって、必ずしも炉心損傷に至るというものではない。そこで、単基で起因事象が発生し、かつ、単基で炉心損傷等に至る場合(領域①および②)と、2基で起因事象が発生し、かつ、単基で炉心損傷等に至る場合(領域③および④)および、2基で起因事象が発生し、かつ、2基で炉心損傷等に至る場合(領域⑤)に分けられる。なお、起因事象発生後の事故シナリオ(緩和対応の成否)により損傷する原子炉設備およびその数が変わることから、あたかも起因事象の段階で損傷する原子炉設備が既定されているように解釈できる領域③～領域⑤の表現は正確ではないが、議論の単純化のため、ここでは、図2の表現により議論を展開する。

1. 起因事象の発生頻度

複数基立地サイトでの起因事象の発生頻度について、設置・立地条件の特徴によりどのように変化するのか考えてみたい。

起因事象が発生しないとそのユニットでは事故には至り得ないため、複数ユニットで起因事象が発生していないと複数基同時の炉心損傷等に至らない。そこで、複数基で発生する起因事象(以下、「MU 起因事象」という。)と単基のみで発生する起因事象とに分けて考える必要がある。Seabrook 原子力発電所でなされた MUPRA²⁾での MU 起因事象は、(a)両ユニットに影響を受ける事象、(b)特定の条件下で両ユニットに影響を受ける事象および(c)独立して各ユニットに作用する事象の3つに分類される。

(a)は外部電源喪失、地震、外部洪水等を対象としており、起因事象を引き起こす共用設備の損傷や複数基に同時にインパクトを与える外部ハザードを対象としている。これらは、もともと単基の原子炉を対象とした評価においても、すでに起因事象の発生頻度として考慮されていることから、複数基に議論を拡張しても「単基での起因事象発生頻度」には影響は与えず、「単基のみでの起因事象発生頻度」と「複数基での起因事象発生頻度」の配分に影響がある。(b)はタービンミサイル等を想定しており、一方の原子炉設備で発生した起因事象の影響が他方の原子炉設備に波及することを想定している。これは対象を複数基にすることによりはじめて顕在化するものであり、「複数基での起因事象発生頻度」とともに「単基での起因事象発生頻度」にも影響がある。しかしながら、実態としては設計段階でも考慮されており、その影響は小さいものと思われる。また、(c)については、偶発的な

図3 起因事象に係る事象の共通要因度合いによるサイトリスクへの影響のイメージ

事象の組合せを対象とするため、その発生頻度は非常に小さいものと推察される。

起因事象を引き起こす機器の共有度合いや複数基に確定的にインパクトを与えるハザードの割合により、図3に示すようにサイトリスクの様相が変化する。

このことから、一基以上の原子炉設備での起因事象発生頻度はせいぜい原子炉設備の数倍程度となり、機器の共有度合いや複数基に確定的にインパクトを与えるハザードの割合が大きい場合には小さくなり、最小で単基と同等となる。ただし、機器の共有度合いや複数基に確定的にインパクトを与えるハザードの割合が大きいということは、複数同時発災の割合(③～⑤のx軸方向の長さ)が大きくなることを意味し、事故緩和対応の失敗確率が高くかつ影響度が大きい状態、すなわち、③～⑤の直方体の体積が大きい状態であり、リスクが下がる(直方体の体積の和が小さくなる)ことを意味する訳ではないことに留意が必要である。

2. 事故緩和対応の失敗確率

複数基立地サイトにおいて事象が発生した際の事故の緩和対応の失敗確率が、単基との差異がどのような場合に生じ、どのように影響を及ぼすのかを考えてみたい。

IV章の複数基同時発災の影響における整理を見る限り、複数基立地による事故緩和対応の失敗確率やリスクを高めるのは、サイト内に複数基立地することによりも複数基が同時発災することによるものと考えられる。そこで、複数基で起因事象が発生する場合(領域③、④および⑤)のリスクに影響があると考えられる。

複数基が同時発災した場合には、複数号機からの事故に関する情報が入り乱れ、サイト状況の把握や判断が単基での発災時に比べ困難な状況が想定され、意思決定・判断の失敗や緩和対応における過誤の可能性を高め得る。そのため、単基のみで起因事象が発生した場合に比べ、事故緩和対応が困難な状況に置かれ、その失敗確率は高まると考えられる。また、近接原子炉設備において事故が進展し、炉心損傷に伴う空間線量の増加やFP放出、水素爆発により、事故緩和作業が困難になったり、作業現場への立ち入りが困難になったりする障害だけでなく、緩和設備への物理的な影響も発生し得る。1F事故以降、どの発電所でもサイト内での水源や可搬型設

図4 複数基立地による事故緩和対応の失敗確率への影響のイメージ

備、事故対応要員が増強されているが、それでもなお事故緩和作業に必要な資機材や要員等リソースが不足する可能性は残る。その影響もまた、単基のみで起因事象が発生した場合に比べ、事故緩和対応の失敗確率を高めると考えられる。なお、この影響はプラントの事故進展状態に特に左右される。すなわち、他号機で厳しいプラント状態のときに顕著に発現する。また、原子炉設備間でSSCの共有・相互接続や損傷・機能喪失要因の同一性が多くある場合には、複数の原子炉設備で同様にSSCの損傷等が発生することにより、同様の事故シナリオを辿る可能性が高くなる。すなわち、「単基での事故緩和対応の失敗確率」には影響は与えず、「単基のみでの事故緩和対応の失敗確率」と「複数基での事故緩和対応の失敗確率」の配分に影響がある。

一方で、他号機からの号機間融通は他号機のプラント状態によりその実施可否が左右されるものの、冗長性を高めることから、特に他号機が安定した状態である領域①および②リスクの低減に働くものと期待される。

このことから、複数基立地の場合には他号機からの融通によるリスクの低下が期待される(図4の上段 領域①および②)が、複数基での同時発災時には単基での発災に比べ緊急時対策所や屋外対応の困難化により緩和対応失敗確率が増加する(図4の上段 領域③、④および⑤)。また、SSC間で共有・相互接続、故障要因の同一性が大きい場合には複数基での事故緩和対応失敗となる確率が増える(図4 領域③、④および⑤のx軸方向の長さの変化)。

3. 影響度合い

複数基立地サイトで事故が発生した場合の影響度合いについて、単基との差異がどのような場合に、どの程度生じる得るのかについて考えてみたい。

サイトが保有するFPの量は、原子炉設備の数に応じて増えることになり、FPの放出量は、複数同時発災の文脈においても単独発災時とFP放出割合が著しく変わらないと仮定すると、損傷した原子炉設備の数に比例し、影響度合いも同様となると考えられる。そのため、領域①および③のz軸方向の長さ、および領域②および④のz軸方向の長さはそれぞれ同じで、領域⑤では、領域①および②の和と同程度となる。ただし、Seabrook

原子力発電所のMUPRA²⁾によると、単基の事故の場合には、いくつかのシナリオで周辺公衆において被ばく量が放射線による急性死亡の閾値を下回っているが、複数基損傷によるソースタームの増大のために被ばく量がこの閾値を超えることで、SLERFが損傷した原子炉設備の数に単純に比例しないという知見がある。これは、原子炉が保有するFP量、放出割合、周辺の人口分布等に影響されることから、国内の原子力発電所で同様の傾向を示すかについて、確認していく必要がある。

VI. おわりに

本稿では、1F事故事例から複数基立地サイトでの事故の様相を整理し、複数基立地サイトでのリスク値への影響について、起因事象発生頻度、事故緩和対応の失敗確率および影響度合いの3つの観点から定性的な分析を実施した。特に外部ハザードのリスクが大きい発電所においては、複数基立地の影響は大きいものと考えられる。

原子炉設備間でSSCの共用・相互接続および故障要因の共通性の程度が小さい場合には、サイト大での事象の発生頻度は大きくなるものの、影響度合いまでを含めて考えると、リスクとしては設置基数に応じた値となる。一方で、共用・相互接続および故障要因の共通性の程度が大きい場合には、逆の傾向を示す。現状の国内原子力発電所では、安全クラスの高い設備は共用・相互接続されていない。また1F事故以降、資機材や事故対応要員の充足が図られている。依然として外部ハザードによる故障要因の共通性という問題は残り、MUPRAといった定量的な評価の必要性は残る。MUPRAの実用化へ対応する手法・データ収集・分析の技術開発を継続することは重要である。

－ 参考資料 －

- 1) 三浦弘道, 猪股亮, 神田憲一, “マルチユニットPRAに関する国際動向について,” 日本原子力学会誌 ATOMOS 60.11 (2018) : 687-691.
- 2) Fleming, Karl N. “On the Issue of Integrated Risk-a PRA Practitioners Perspective.” Proceedings of the ANS International Topical Meeting on Probabilistic Safety Analysis, San Francisco, CA. 2005.
- 3) Poghosyan, Shahen, et al. “IAEA Project on Aggregation of Various Risk Contributors for Nuclear Facilities.” 2019.
- 4) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会, “調査報告書(国会事故調)”, 2012.

著者紹介

三浦弘道 (みうら・ひろみち)

電力中央研究所 原子力リスク研究センター
(専門分野/関心分野) 原子力安全工学,
確率論的リスク評価