日本原子力学会「2013年春の年会」
標準委員会セッション3（リスク専門部会）
M会場，近畿大学，2013年3月28日 13:00～14:30

標準委員会セッション3
『PRA の活用にかかる課題とその解決への取り組み』

原子力発電所に関する 内部火災PRA標準の策定について

東北大学 高木 敏行
(独)原子力安全基盤機構（JNES） 小倉 克規
一般社団法人原子力安全推進協会（JANSI） 村田 尚之

1. 標準策定の経緯と背景

リスク評価標準（PRA標準）の策定

内的事象に関するPRA標準の策定

●レベル1,2,3 PRA標準・・・2008年4月発行済

→ レベル1は現在定例改定作業中

●パラメータ標準 ・・・ 2010年6月発行済

●停止時PRA標準・・・2011年11月発行済

☆2011年3月11日・・・東日本大震災発生！

↓

外的事象（地震、津波、火災等）のPRA標準を最優先に策定

↓

●地震PRA標準	→	改定作業中
●津波PRA標準	→	2011年12月発行済
●内部溢水PRA標準	→	2012年11月発行済
●内部火災PRA標準	→	2012年6月分科会開始

火災安全とは

- **一般的な火災安全の概念**
  - 目的：人命安全と物損の低減、その建物以外への影響防止
    - ✓ **避難安全**　（判断基準：避難完了時間　≦　避難限界時間）
    - ✓ **耐火構造**　（判断基準：火災継続時間　≦　保有耐火時間）
    - ✓ **その他**　（出火防止、延焼防止、消火活動への備え）

- **原子力発電所の火災防護設計**
  - 目的：原子炉を止める・冷やす機能と放射性物質を閉じ込める機能の維持
    - ✓ 安全上重要な構築物、系統、機器に対する火災影響からの防護（判断基準：①火災時に単一故障を仮定しても原子炉を高温停止できる設計。②低温停止に必要な系統はいかなる火災によってもその機能を失わない設計。（発電用軽水型原子炉施設の火災防護に関する審査指針より））

→ この設計の妥当性を火災PRAで確認

火災PRA開発の歴史（1/2）

1975年3月22日

- ブランズフェリー原子力発電所1号機（BWR/4）での火災
  - 1,600本以上のケーブルが損傷（そのうち628本が安全関連ケーブル）。
  - 常用及び非常用の原子炉冷却系の機能とプラント状態監視機能に支障をきたす。
  - 調査の結果、従来の安全審査における火災防護に関する評価、**特に火災後安全停止機能防護の評価が不十分であったことが判明。**

1980年

- 火災防護規則の強化（以下の規則を追加）
  - 10CFR※50.48：火災防護プログラムの作成、10CFR50.48附則Rへの適合を要求。
  - 10CFR50 附則R：火災防護プログラムの基本策定要領、**火災ハザード解析、火災後安全停止解析の実施要求**、火災防護に関する個別要件（バックフィット要件を含む）を明示。

※米国の原子力規制機関（NRC）が作成する連邦規則（Code of Federal Regulation）

火災PRA開発の歴史(2/2)

1990年代

- 外部事象に関する個別プラント評価(IPEEE)
  - 運転中の全プラントで、火災、地震、強風、外部洪水、その他の外部事象に対するリスク評価を実施(**安全対策の強化が目的**)。
  - 火災によるCDFは、プラントの全体的なCDFに対して大きく寄与する可能性があり、また内部事象CDFより高い場合もありうることが判明。
  - 60%以上の事業者が火災リスクを低減するための改善策を摘出・実施。
  - **事業者の間で、火災評価の諸要素の相違(手法や仮定のばらつき)が大(=評価結果の不確かさも大)。**

2000年代

- リスク情報を活用したパフォーマンス・ベースの火災防護規則
  - 従来の火災防護規制(10CFR50附則R)が事業者に過度の負担を強いているという認識が高まる。
  - NRCはNFPA※ 805「パフォーマンスベースの火災防護プログラム基準」を参照する新たな規制適合オプションを追加。
  - 最新知見を反映した火災PRA手法(**NUREG/CR-6850**)の開発。

※全米防火協会(National Fire Protection Association)は火災安全に関わる事業を行う民間非営利団体

我国における火災PRAの実施状況

・原子力安全基盤機構

- 平成19年度までに、軽水炉の出力運転状態を対象とした内部火災レベル1 PRA手法を整備
- 平成21年度までに、NUREG/CR-6850の回路解析手法を反映した内部火災レベル1 PRA手法を整備
  - 内部火災レベル1 PRA実施手順書を作成
  - 国内の代表的PWR及びBWRプラントモデルを対象に試評価を実施
  - 総ての成果報告書は原子力安全基盤機構のWEBに公開

・事業者

- 自主保安活動を進める上での参考情報として活用することを目的に、火災PRA手法の開発・整備に努めてきている。
- 平成24年度までに、内部火災レベル1PRA手法整備の一環として、PWR・BWRの代表プラントを対象として、NUREG/CR-6850を参考に、その適用性について検討し、課題を抽出。
- 現在、上記で抽出された課題に対する対応を検討するとともに、従前から検討してきた評価手法も見直しながら、評価手法を整備しつつある。

２．内部火災PRA標準の概要

内部火災PRA標準の目的・使用法・効果

目的

事業者の安全確保対策や国の規制活動に適用可能なレベルの品質を確保できる内部火災PRAの実施手順の整備

使用法

火災PRAを内部火災PRA標準の要求に基づき実施することで火災に関するリスク情報を定量的に抽出

効果

抽出された火災に関するリスク情報を事業者の安全確保対策や国の規制活動に活用することでの原子力発電所の安全性の更なる向上

内部火災の定義と本標準の適用範囲

		火災の要因となる事象	
		内的要因	外的要因
火災源の場所	発電所の内部（内部火災）	① 機器の不具合や保守活動時の人的過誤等の内的要因によって発生する火災	② 地震等の外的要因によって発電所内部の機器等が破損し，それが原因となって発生する火災
	発電所の外部（外部火災）	－	③ 地震等の外的要因によって発電所外部で火災が発生し，それが発電所内部へ延焼する火災

内部火災の定義範囲　①②

本標準の適用範囲　　①

内部火災PRAが扱う物理化学現象

＜対象＞

- 原子炉の運転や起因事象の緩和に必要となる設備の正常動作を阻害する火災
- 原子炉の安全停止に必要な設備への**熱的な影響**
- 火災が発生した火災区画から他の火災区画への火災の伝播

＜対象外＞

- **煙**に含まれる微粒子等が機器に与える影響
- 爆発等により発生する**飛来物**の影響

内部火災PRA標準のねらい

☆内部火災を起因とするレベル1PRAを実施するために必要な要件、及びその要件を満たす具体的方法を定める。

［対象とする施設］

- 炉型・・・軽水型原子力発電所
- 運転状態・・・出力運転状態
- 地震・津波等の外的事象による設備の破損等に伴う内部火災は，本標準の適用範囲外

内部火災PRA標準の構成

３．標準策定の課題

内部火災PRA標準の主な課題

	国内評価手法の整備	国内データの整備	評価結果への影響度	備考
火災[illegible]	×	[illegible]	[illegible]	データベースの整備については、機器故障率等、PRAで使用する[illegible]検討中。
プラント情報調査	○	—	中	
火災解析モデル	×	×	[illegible]	[illegible]について国際プロジェクト等により検討中。
過酷度因子（発熱速度・消火確率）	×	×	大	[illegible]データはなく、海外データを使用する際には国内[illegible]の適用性について検討が必要である。
回路解析	△	×	[illegible]	[illegible]はなく、海外データにも大きな保守性、不確実性が含まれる。
人間信頼性解析	×	×	大	国内外に確立された火災時の人的過誤評価手法は存在しない。
複数起因事象	×	△	中	同時発生の扱いについて、分科会にて検討中。

評価結果への影響度が大きい次の項目を重点的に検討

火災解析モデル
過酷度因子
回路解析
人間信頼性解析

○：手法、データベース等が整備されており適用可能。
△：手法、データベース等があるが適用については検討が必要。
×：手法、データベース等の整備が必要。

内部火災PRA標準の主な課題

課題1：　火災解析モデル

火災解析モデルの必要性

「10.火災シナリオの詳細設定」における課題

- 適切な火災影響範囲の同定による損傷時間の算定
- 合理的な火災解析モデルの適用
- 火災解析モデルとは,

“火災源によるプルームや高温ガス層の発達を追跡し、火災区画内のケーブルや機器等への影響を評価するモデル”

火災解析モデルの種類

- ゾーンモデル: 例 CFAST（NIST）
  - マクロ的な観点から区画の熱流動性状を単層もしくは二層とみなし，気体の質量やエネルギーのバランスを記述した実用的な数学モデル。
  - 火災安全性を評価する上で必要となるおおよその情報が小さな計算コストで得られる。
- フィールドモデル：例 FDS（NIST），ISIS(IRSN)
  - 数値流体力学に基づくモデル。
  - 一般に，複雑な形状で構成された区画を対象とする場合や火災事象の詳細な評価が必要な場合に適している。

FDSによる火災評価例

火災解析モデルの適用限界

- 区画壁からの放熱、火災源の発熱および換気条件等の境界条件は、解析結果に大きく影響するため、適切な設定が肝要

解析条件		影響度
モデルパラメータ	プルーム	小
	ふく射	小
境界条件	区画放熱	大
	熱源面積	小
	発熱速度	大
	換気量	中

出典　火災モデルCFASTによる大規模区画内火災解析（その1），電中研報告N11061

本標準での対応と今後の課題

- 本標準での対応：「10.火災シナリオの詳細設定」
  - 各火災源に対する火災影響範囲の設定
    →火災源に比べ空間容積が小さく、換気流量の影響が大きい場合：
    感度解析による評価の保守性の確認が必要
  - 損傷時間を適切に計算する火災解析モデルが必要
    →例えば、ターゲット温度や煙の濃度等の評価パラメータについては
    感度解析による保守性の確認が必要
  - 附属書L：既存の火災解析ツールの適用範囲と解析能力の例示

- 今後の課題：既存の火災解析ツールの精度向上
  - 多室複雑形状を対象とした精度検証高度化
  - 物体表面・熱源近傍温度等の局所現象の再現性の評価，高度化
  - 火災源の発熱特性を直接予測する手法の開発

内部火災PRA標準の主な課題

課題2:　過酷度因子

過酷度因子とは

- 過酷度因子は、
  “火災源の発熱速度に応じたターゲットの損傷時間の確率分布”
  として定義される。
- 火災源の発熱速度は不確定性を持っているため、ターゲットの損傷時間は確率分布となる。
- 過酷度因子は火災シナリオ発生頻度の算出のために用いられる。
  （標準案10.8 詳細解析のための火災シナリオ発生頻度の算出）

$$\lambda_k = \lambda_{k,j} \cdot \sum_{i=1}^{n} P_k(t_i) \cdot P_{k,NS}(t_i)$$

λ_k	:	火災シナリオkのシナリオ発生頻度（/炉年）
$\lambda_{k,j}$	:	火災シナリオkの火災源jの火災発生頻度（/炉年）
$P_k(t_i)$	:	損傷時間t_iの過酷度因子
$P_{k,NS}(t_i)$	:	損傷時間t_iまでに消火できない確率
n	:	発熱速度の離散化数

過酷度因子の算出方法

発熱速度（HRR）の確率分布

離散化

離散化されたHRRの確率分布

過酷度因子（ターゲットの損傷時間の確率分布）

発熱速度が大きいほど損傷時間は短くなるため、
分布形状は左右反転する。

火災解析により、各発熱速度HRRiにおけるターゲットの損傷時間 ti を算定

消火失敗曲線

過酷度因子の課題

（1）発熱速度

●NUREG/CR-6850の発熱速度を使用する際は、以下の背景を理解しておく必要がある。

・基本的に米国の火災試験データに基づき推定されている。

・試験から得られたデータは、試験に用いた区画の形状や換気条件に大きく依存する。

・発熱速度の確率分布は、米国のエキスパートパネルの工学的判断に基づき作成されている。

（2）消火失敗確率

●NUREG/CR-6850の火災源毎の消火失敗確率を使用する際は、米国の事例に基づき設定されていることを理解しておく必要がある。

本標準での扱いと今後の課題

（1）本標準での対応：「10.火災シナリオの詳細設定」

- 附属書に参考として、NUREG/CR-6850の過酷度因子の算出の考え方を示す（附属書P（参考） 火災シナリオの詳細解析の例）。
- 国内固有の発熱速度と消火失敗確率のデータは存在しない。

（2）今後の課題

- 火災PRAを実施する際に、NUREG/CR-6850の発熱速度と消火失敗確率が参考にされると思われるが、国内プラントへの適用性を検討する必要がある。
- 国内の発熱速度を推定するための試験データの蓄積、消火失敗確率を推定するための国内の実績の調査が必要。
- エキスパートパネルを設置し、試験データや統計データから火災PRA用のデータを定めるための検討が必要。

内部火災PRA標準の主な課題

課題3:　回路解析

回路解析とは

・火災事象における誤信号の発生

－ ブランズフェリー火災事故
原子炉建屋の壁のケーブルトレイ貫通部で発生ケーブル処理室に延焼、約8時間後に鎮火

－ 火災の進展に連れ、安全系の複数の機器が誤動作、誤表示が発生

・回路解析

－ 火災によって損傷した場合、設備が正常な動作をしなくなるケーブル及び回路を同定し、誤動作の発生確率を評価するプロセス

・標準における評価プロセスの反映（標準案 10. 火災シナリオの詳細設定）

－ 回路解析 ⇒ 誤動作モードの摘出
炉心損傷頻度の評価における、火災シナリオの発生頻度や条件付炉心損傷確率へ反映

回路解析手法（その1）

- ケーブルデータの収集
  - 火災PRAにて考慮するケーブルを同定
  - ケーブルリストの作成
  - ケーブルと火災区画を関連付け
- ケーブル故障モード
  - 地絡
  - ホットショート

多芯ケーブルの例

回路解析手法（その2）

・回路／機器への影響
- 誤動作
- 電源喪失
- 制御不能
- 誤表示

・例

Hot Short No.1
（ケーブルAとB導体接触）
Hot Short No.2
（ケーブルAとC導体接触）
が発生
R1リレー励磁及び駆動電流供給

電動弁　誤開

本標準での対応と今後の課題

(1)本標準での対応：「10.火災シナリオの詳細設定」

以下の反映方針について、審議中（附属書M（参考）回路解析）

① 標準における回路解析を回路分析までとする。

② 誤動作モードを定量化してCDFに反映する。

(2)今後の課題

・誤動作モードの摘出

－　誤動作の摘出に関する不確実さ

　二重、三重・・・の誤動作を考慮

・ケーブル導体間のホットショート発生確率等の定量化

－　保守的なデータ（NUREG/CR-6850）

・誤作動、誤表示モード発生の不確実さ

－　例えば、発生が短時間である等

・回路解析の作業量が大

－　ケーブルデータの収集、回路分析時間

以上のような課題に対し、現状の最新知見を調査・反映

内部火災PRA標準の主な課題

課題4:　人間信頼性解析

火災時の人的過誤事象の評価項目

原子力プラントで
火災発生

火災発生
アラーム

①火災事象下での
運転操作

運転員へのストレス高

ケーブル損傷

・火災発生場所は？
煙は充満？
消火は可能？

中央制御室への
誤信号発信

②消火活動に係る
現場操作

③誤信号発生時の
誤操作

アクセス性、消火活動
の不確実さが大

事象認知が
困難な状況発生

現状の評価手法

- **THERP**
  - 内的事象PRAでは標準的な手法
  - 運転員と手順書のインターフェースを考慮したHRAイベントツリー手法
  - 火災時の環境条件を考慮した評価（ケーブルホットショートが原因の誤動作等）は困難

THERP 手法に人間信頼性解析の例

一連の作業 abc に失敗する確率

$$1-P(abc)=P(A)+P(a)P(B\mid a)+P(ab)P(C\mid ab)$$

- **スコーピング手法(NUREG-1921)**
  - NUREG/CR-6850の保守性を排除するために開発
  - フローチャートを用いた簡便な評価方法

現状の人的過誤事象評価の問題点

- NUREG/CR-6850では内的事象PRA使用されている運転操作失敗確率(HEP)を10倍して使用するなどの簡易的な評価が示されている。
- 火災時の環境条件まで考慮した運転員と手順書のインターフェースを評価する手法は存在しない。
- 回路故障に伴う誤表示が発生した際の運転員操作は不確実であり評価は困難。
- 現状は内的事象PRAの評価結果に基づき保守的な評価にならざるを得ない。

本標準での対応と今後の課題

(1)本標準での対応:「9.火災シナリオのスクリーニング」
「10.火災シナリオの詳細設定」

- 火災シナリオのスクリーニング解析において、人的過誤事象を同定して火災PRAモデルに反映。
- スクリーニング値を用いて火災シナリオを定量化 。
- 火災シナリオの詳細設定においては、火災時特有の新たな人的過誤事象を追加(消火活動等)。

(2)今後の課題

- 合理的な人的過誤事象の評価手法の検討とその手法の火災PRA標準への反映。

4. まとめ

火災PRA分科会における取組み

目的:　火災PRA標準の策定

- 日本原子力学会 標準委員会 リスク専門部会に「火災PRA分科会」を設置（2012年6月）
- 委員は、原子力関係に留まらず、火災の専門家等、幅広い人材を結集［学識経験者(3名)、学術研究機関(2名)、関係官庁等(2名)、電力事業等(4名)、製造業(3名)、エンジニアリング会社等(3名)、非営利団体(1名)の計18名］
- 内部火災PRA標準として規定すべき適用範囲、要求内容を検討
- 策定に当たっては、主に米国のASME/ANS標準等を参考
- 第7回分科会まで実施済（2013年3月現在）

☆内部火災PRA標準・・・2013年6月中間報告予定

火災PRA分科会　開催実績と今後のスケジュール

	2012年6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	2013年1月	2月	3月	4月	5月	6月
標準委員会													◎（中間報告）
リスク専門部会	●（6/1）						●（12/3）						○（中間報告）
分科会	第1回 ★（6/11）	第2回 ★（7/26）		第3回 ★（9/6）	第4回 ★（10/17）		第5回 ★（12/6）	第6回 ★（1/28）	第7回 ★（2/28）		第8回 ☆（4/4）	第9回 ☆（5/30）	
主な議題	・人事 ・火災PRA分科会の設置 ・火災PRAの概要 ・国内検討状況 ・海外文献紹介 ・火災PRA標準策定における論点 ・今後のスケジュール及び作業分担	・火災PRA標準の適用範囲 ・国内外火災発生実績 ・標準骨子案		・標準案、に関する議論（第1章～3章） ・一般建築物の火災に対する設計の考え方 ・火災解析モデル	・人事 ・前回コメントの反映（第1章～3章） ・標準案、に関する議論（第4章～第11章）		・標準案、に関する議論（第1章～第12章）（前回コメント対応含む） ・リスク専門部会コメントの紹介	・前回コメント対応（第1章～第12章） ・学会発表原稿 ・PSA2013アブストラクト	・前回コメント対応（第1章～第12章） ・学会発表原稿		・標準案、全体を通して議論（1/2） ・火災PRA標準策定における論点の整理・反映項目の検討	・標準案、全体を通して議論（2/2） ・部会中間報告用資料案	

［中間報告後の主要スケジュール］
2013年12月　　最終報告
2014年　春　　パブリック･コメント
2014年　6月　　制定

期待される効果と次のステップ

- 内部火災を起因とするレベル1PRAを実施するために必要な要件及びその要件を満たす具体的方法を定める。
  - 2014年6月に制定予定

[期待される効果]

①事業者による内部火災PRAの実施促進

→ 安全確保活動における合理性、客観性、透明性の向上

→ リスク低減のための効果的な対策の立案・実施

→ 地元住民への説明性の向上

②安全規制における意志決定プロセスへの支援

[次のステップ]

- 地震従属火災PRA標準の策定について検討予定

ご静聴ありがとうございました。