

緊急事態区分に対する 炉心損傷以外の評価視点の検討

令和2年10月26日
第28回研究報告会

原子力規制庁 シビアアクシデント研究部門
小城烈

令和2年11月27日日本原子力研究開発機構「安全研究センター報告会」にて、
講演(招待講演)予定。

目次

1. 背景
2. 本研究の目的と実施方針
3. 実施内容
 - 3.1 防災シナリオの特徴分析
 - 3.2 炉心損傷以外の指標による防護措置の試解析
4. まとめと今後の課題

1. 背景 (1/3)

- 緊急時活動レベル(EAL)の設定 -

原子力緊急事態への初期対応

緊急事態区分(EC)	原子力施設からの距離		
	～5 km 予防的防護措置の準備区域(PAZ)	5～30 km 緊急防護措置の準備区域(UPZ)	30 km ～ UPZ以遠
警戒事態(AL) 原子力災害対策指針(原災指針)に定める	一部防護措置の準備 <地方公共団体の主な対応> 要配慮者避難準備		
施設敷地緊急事態(SE) 原災指針、原災法第10条に定める	防護措置の準備・実施 <地方公共団体の主な対応> 避難準備・要配慮者避難	防護措置の準備	
全面緊急事態(GE) 原災指針、原災法第15条に定める	防護措置の実施 <地方公共団体の主な対応> 避難実施	防護措置の準備・実施	必要に応じて防護措置を実施

→ 事故等が発生した原子力施設の状態から、どの緊急事態区分の対応をするか判断するための基準として、「**緊急時活動レベル(EAL)**」が定められている。

※事業者は具体的にEAL(を含む防災業務計画)を定め規制委員会に届け出る。

➡ その妥当性を評価する基準・手法を規制委員会として所有する必要がある。

1. 背景 (2/3)

- EALに関する現状 -

現在のEALに関する研究と課題

● 経緯

現行のEALは炉心損傷に至る可能性のある項目を抽出して定めている。

一方で、重大事故等対処設備の拡張によって炉心損傷から格納容器機能喪失までの時間が長期化する可能性があること、炉心損傷に至る可能性のある事象が発生しても格納容器の健全性が維持される可能性がある。

原子力規制庁では、オンサイト・オフサイトの両面からEALの見直しを行う予定である¹⁾。

● 課題

避難や屋内退避による負荷が過大になっている場合にはEALの適正化が必要となる。

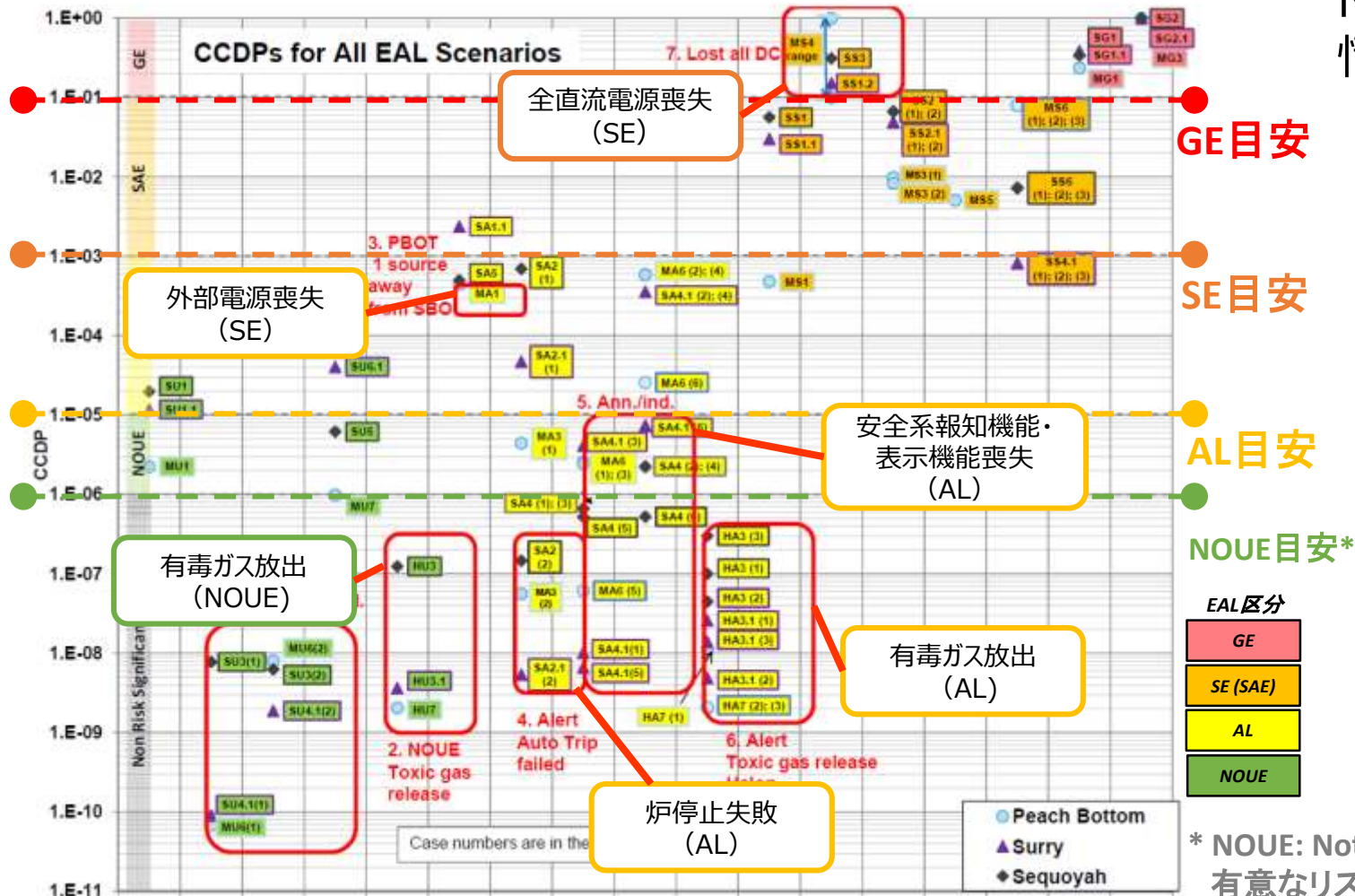
しかし、これまでの安全研究においては、EALの見直しに資するためのリスク評価に基づく分析手法、GE発生から格納容器機能喪失までの時間的余裕の検討が十分ではない。

1. 背景 (3/3)

- リスク評価に基づく分析の既往例 -

NUREG/CR-7154²⁾では、プラント性能(リスク情報)に基づくアプローチがなされた。

- ✓ EAL毎の条件付炉心損傷確率(CCDP)を計算
 - 代表3プラントのCCDPをEALごとに計算
- ↓
- ✓ ECの定量的な検証
 - 緊急事態区分(EC) 目安との比較を実施



【ポイント】
EAL発生後の炉心損傷に至る確率を定量的に把握できている。

【課題】
いつ炉心損傷・格納容器損傷するか及び外部への影響がどの程度なのかについても、事態の深刻度を表す重要な尺度であるが、このアプローチでは考慮されない。

* NOUE: Notification Of Unusual Event
有意なリスクが無いとされる区分(日本にはない区分)

2) M. Azarm et. al., "Risk Informing Emergency Preparedness Oversight: Evaluation of Emergency Action Levels- A Pilot Study of Peach Bottom, Surry and Sequoyah", NUREG/CR-7154, Vol.1, USNR, Jan. 2013

2. 本研究の目的と実施方針

- 目的 -

EALの見直し等に資するための防災研究として、既往の研究結果を用いて、事故シナリオごとの防災シナリオの特徴を分析し、より合理的なEAL又は避難のトリガーを検討するための手法を整備する。

- 実施方針 -

定量的なパラメーターに基づくプラント状態の評価手法を検討

1. 防災シナリオの特徴分析

- 既存の研究データを用い、事故シナリオごとに防災シナリオの深刻度を、EALから放出までの確率、格納容器(CV)損傷の時期及び外部への影響の尺度で整理し、特徴を分析した。
- 今後、重大事故等対処設備を考慮する場合との比較のため、従来シナリオを用いてEALの見直しのための視点を整理する。

2. CV損傷までの時間を考慮した防護措置の試解析

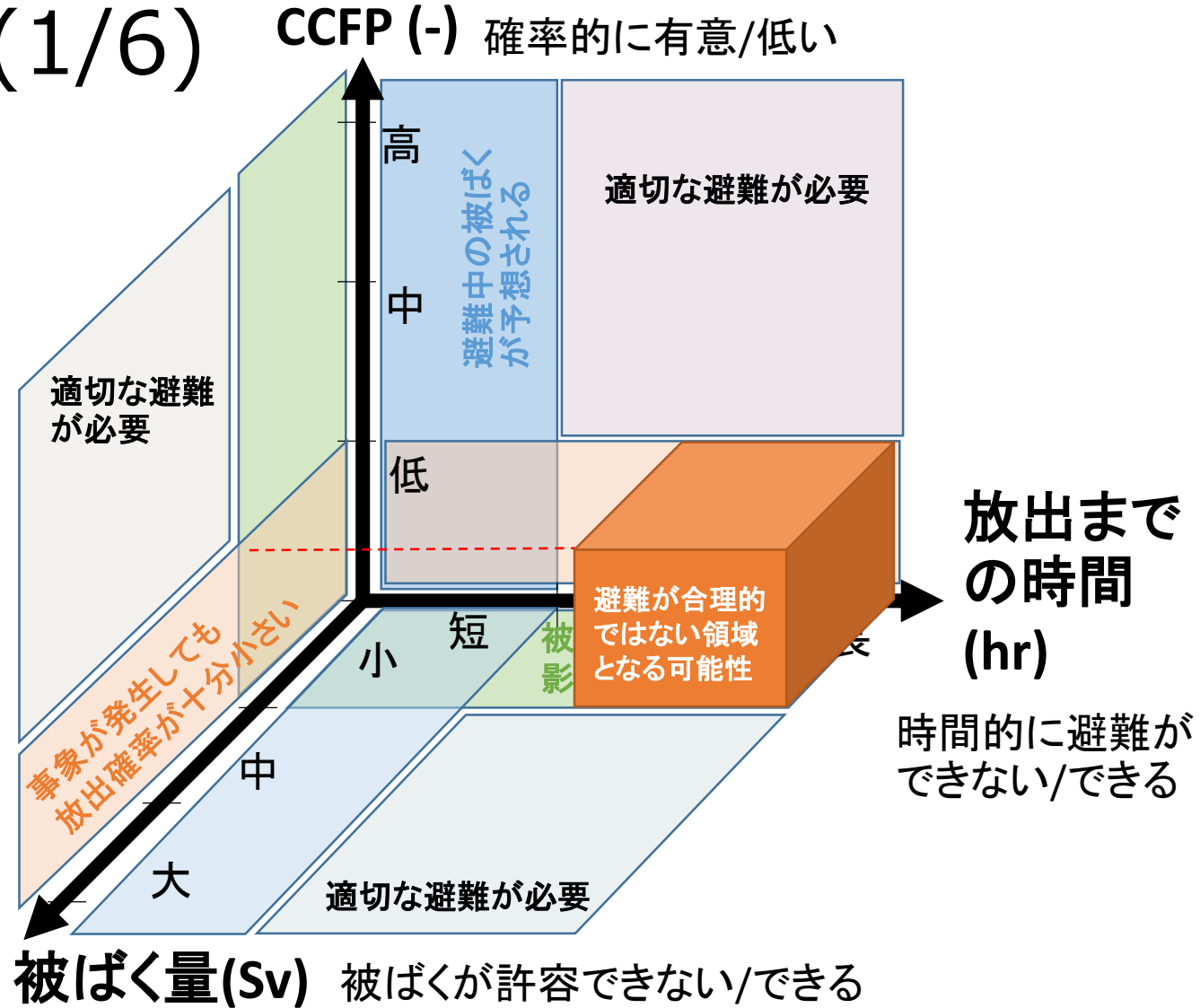
- 避難開始時期をGE発出時に限定しない場合の防護措置を代表シナリオで試解析

3.1 防災シナリオの特徴分析 (1/6)

- 分析の着眼点 -

防災シナリオの特徴として、EALから放出までの確率、格納容器(CV)損傷の時期及び外部への影響が重要な項目である。これらを同時に考慮するために以下の指標を選定し、防災シナリオの特徴を整理する。

- ① 放射性物質放出までの時間
避難までに十分な余裕がある場合があり、避難開始の判断を合理化できる可能性がある。
- ② 個人被ばく量
被ばくの影響が十分小さい場合があり、不要な避難を実施しなくて良い可能性がある。
- ③ 条件付格納容器機能喪失確率 (CCFP)
事象が発生しても放出に至る確率が十分小さい場合があり、EAL発生後に事態が収束し、避難を行わないで良い可能性がある。



➡ 深刻度が低い領域では、より合理的な防護が可能ではないか??

3.1 防災シナリオの特徴分析 (2/6)

- 各項目の導出手順 -

代表的なPWR及びBWRプラントについて、既往の事故シーケンスごとに以下の情報を整理する。

① 放射性物質放出までの時間

事故進展解析結果から、炉心損傷時刻、原子炉容器(圧力容器)損傷時刻及び格納容器機能喪失時刻を抽出する。

✓ 現行のGEは炉心損傷に関連する指標として定められているが、実際に格納容器機能喪失までの時間的余裕はシナリオによって異なる。そこで、炉心損傷以外の指標で、炉心損傷後から格納容器機能喪失までに検知可能であると思われる指標を用いた場合について検討を行うため、ここでは炉心損傷と格納容器機能喪失の間に発生することが想定される原子炉容器(圧力容器)損傷から放出までの時間について整理する。

② 個人被ばく量

事故進展解析結果の放射性物質放出率から空間線量率を計算する。

③ 条件付格納容器機能喪失確率(CCFP)

既存の研究データ³⁻⁶⁾を利用して抽出する。

✓ 放射性物質放出に着目すること、低頻度のシーケンスも考慮可能なことから、CCFPを用いる。

✓ CCFPの導出は分岐確率を用いて簡易計算する。

※重大事故等対処設備は考慮しない

✓ 重大事故等対処整備を考慮した場合には、管理放出を含む複雑なグループ化が必要となる。このため、まず、重大事故等対処設備を考慮しない場合について、その特徴を整理し、着目すべき点を分析する。今後、重大事故等対処整備考慮した場合との比較を行う。

3) 原子力発電技術機構原子力安全解析所, “平成 12 年度レベル 2PSA 手法の整備に関する報告書 = PWR プラント =”, INS/M00-13.

4) 原子力発電技術機構原子力安全解析所, “平成 12 年度レベル 2PSA 手法の整備に関する報告書 = BWR プラント =”, INS/M00-14.

5) 独立行政法人原子力安全基盤機構, “予防的防護措置範囲検討のためのレベル 2PSAの解析(BWR)”, 10 原シ報-0010, JNES/NSAG10-0010.

6) 独立行政法人原子力安全基盤機構, “予防的防護措置範囲検討のためのレベル 2PSAの解析(PWR)”, 10 原シ報-0011, JNES/NSAG10-0011.

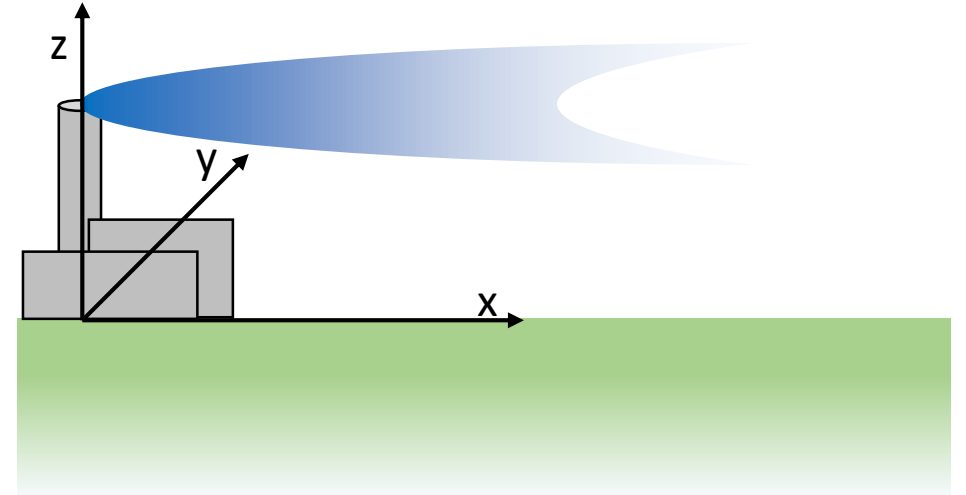
3.1 防災シナリオの特徴分析 (3/6)

- 対象とした事故シーケンス -

炉型	PDS記号	CV破損モード記号	事故シーケンス概略
BWR (ABWR)	TQUV	τ (過温破損)	過渡事象 + 給水喪失 + ECCS失敗
	TQUX	δ (過圧破損)	過渡事象 + 高圧給水失敗後原子炉減圧失敗
	TW	θ (PCV除熱失敗による先行破損)	過渡事象 + PCV除熱失敗によるPCV先行破損
	AE	τ (過温破損)	大破断LOCA + ECCS起動失敗
	V	ν (IS-LOCA)	インターフェイスシステムLOCA + ECCS起動失敗
	TBU	δ (過圧破損)	SBO + 時RCIC起動失敗
	TB	δ (過圧破損)	SBO + RCIC起動(8時間)電源復旧失敗
	TC	θ (PCV除熱失敗による先行破損)	ATWS + CV除熱失敗によるCV先行破損
PWR (4ループ PWR)	SL	δ (過圧破損)	小破断LOCA + ECCS再循環失敗
	AE	δ (過圧破損)	大破断LOCA + ECCS起動失敗
	AL	β (隔離失敗)	大破断LOCA + ECCS再循環失敗 + CV隔離失敗
	P	θ (CV除熱失敗による先行破損)	2次系除熱 + CVスプレイ失敗 + CV除熱失敗によるCV先行破損
	G	g (SGTR)	SGTR + ECCS起動失敗
	V	ν (IS-LOCA)	インターフェイスシステムLOCA + ECCS再循環失敗

3.1 防災シナリオの特徴分析 (4/6)

- 空間線量率の計算 -



✓ ガウスプルームモデルを用いた簡易線量計算を実施

- クラウドシャインとグランドシャインのみ考慮
- 対象核種はNUREG/CR-7110⁷⁾を参考に設定
 - 57核種 (^{133}Xe , ^{123}Xe , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{91}Sr , ^{92}Sr 等)を考慮
 - 8グループ(希ガス類、Cs類、Ba類、Ru類等)を考慮
- エアロゾルは沈着を考慮
 - 簡単のため沈着速度 0.1 m/sで一定と仮定
- 線量率は換算係数⁸⁾を用いて計算
 - 崩壊チェーンは基本的に考慮しない
- 結果は、2km地点での30分平均での最大値を整理

$$C(x, t) = \frac{Q \left(t - \frac{x}{u} \right) \exp\left(-\lambda \frac{x}{u} \right)}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \left\{ 2 \cdot \exp\left(-\frac{(H)^2}{2\sigma_z^2} \right) \right\}$$

C : 大気中放射性物質濃度(Bq/m³) u : 風速(m/s)
 Q : 放射性物質の放出速度(Bq/s) λ : 崩壊定数
 σ_y, σ_z : 拡散幅のパラメーター H : 放出高さ(m)

その他の条件

- 風下中心軸上で評価
- 放出高さは格納容器破損前: スタック高(100m)
格納容器破損後: 地表 (0 m)
ただしSBO時はすべて 0m

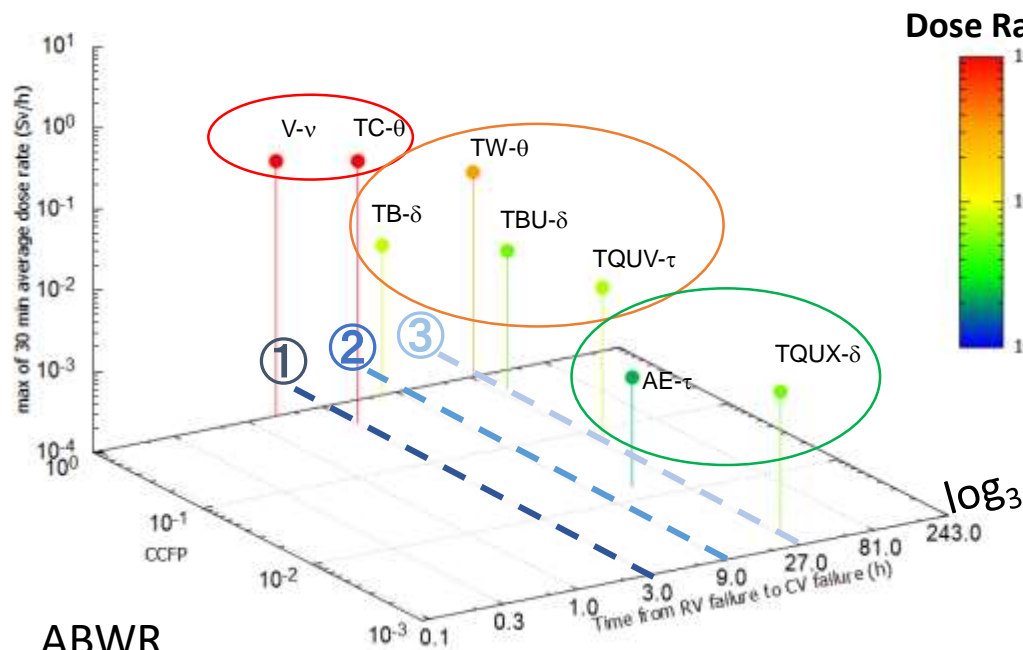
7) N. Bixler, et. al., "State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project", NUREG/CR7110, Nuclear Regulatory Commission, 2013

8) Keith F. Eckerman et. al. "External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil" Federal Guidance Report No. 12, EPA-402-R-93-081

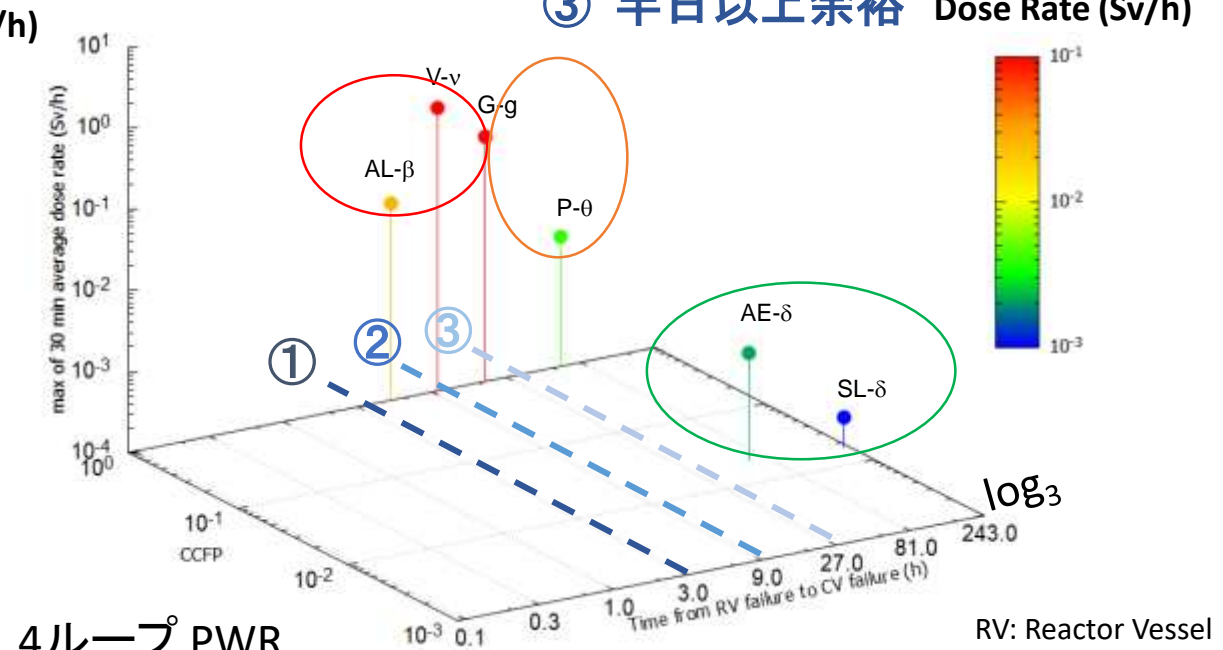
3.1 防災シナリオの特徴分析 (5/6)

- 分類結果 -

- ① 避難時にプルーム通過の可能性あり
- ② 概ね避難可能
- ③ 半日以上余裕



ABWR



4ループ PWR

RV: Reactor Vessel

- 短時間で格納容器機能喪失し、高線量
 - 避難する時間はあり比較的高線量
 - 時間的余裕が大きい
- のいずれかに分類できる

結果の特徴整理

- バイパス、隔離失敗等のシナリオでは、線量が高く、CCFPが高い。
- RV損傷から放出までの時間が長いほど、CCFPも低くなる傾向となった。
- RV損傷から格納容器機能喪失まで十分に時間の余裕がある場合には、即時避難をしなくてもよい可能性がある。

3.1 防災シナリオの特徴分析 (6/6)

- 特徴分析の結果 -

• 時間的余裕の少ないケース

- A) 防護措置実施の時間が非常に短い
 - ATWS
 - IS-LOCA, SGTR等のバイパスシナリオ
 - 早期炉心損傷＋隔離失敗
- B) GE発出後直ちに避難すれば、CV損傷前に避難完了できる
 - トランジェント＋注水失敗
 - LOCA＋格納容器過圧破損等

• 時間的な余裕が少ない場合には、早急な判断と行動が必要

- ✓ 発生すれば高線量になる可能性があり、避難の判断は合理的である。
- 懸案事項として、
 - GE発出から格納容器機能喪失までの時間が短い場合には、避難時にプルーム通過の可能性がある。
 - 避難が空振りとなる可能性がある。

• 時間的余裕が十分長いケース

- C) 時間的余裕があり防護措置を即実施しなくても被ばくリスクが限定的なケース
 - トランジェント＋RCICのみ使用可能
 - トランジェント＋スプレイ再循環失敗

• 時間的な余裕が大きければ、事故対策が成功する可能性がある

- ✓ 即時避難が不要となる場合がある。
- ✓ UPZは長期間の屋内退避となる可能性がある。

3.2 CV損傷までの時間を考慮した防護措置の試解析(1/4)

- EALの見直しのための視点-

1. 確率論的な評価からの視点

CV損傷が避けられない場合と収束の可能性が高い場合で対応が変わる可能性がある。

➤ CV損傷が避けられない場合: FP大規模放出までに避難完了する必要がある。

➤ 収束の可能性が高く、見込まれる線量が低い場合: 避難対象の合理化が考えられる

2. 格納容器(CV)損傷の時期及び外部への影響からの視点

GE発出から放射性物質の放出までに時間がある場合には、対策が成功する可能性があり、必ずしもGE発出と同時に避難する必要がない場合があり、より合理的な避難のトリガーが考えられる。

なお、より合理的な避難のトリガーを考える(避難を遅らせる)場合には、重篤な確定的影響を回避し、確率的影響のリスクが許容可能な範囲であることを確認するために被ばく線量を評価する必要がある。

即時避難以外の防護措置の検討

過早な防護措置実施を避け、かつ、被ばく線量が受容可能なレベルにとどまる例を検討

✓ シナリオと防護の検討: 実現可能な避難のトリガーと避難方法を検討する。

✓ 被ばく線量評価: 上記のトリガー(避難を遅らせる場合)での被ばく線量を試解析する。



3.2 CV損傷までの時間を考慮した防護措置の試解析(2/4)

- 即時避難以外の防護措置の検討 -

GEの発出から格納容器機能喪失までの時間が長いシナリオを選定し、GE発出以外を避難のトリガーとした場合の試解析を行う。

1. 事故シナリオの選定

「3.1 防災シナリオの特徴分析」の結果から

- a. GEの発出から格納容器機能喪失までの時間が長い
- b. 原子炉容器(圧力容器)の破損から格納容器機能喪失までに避難可能
- c. 条件付きの格納容器機能喪失に至る可能性が高い

といった特徴を備えるABWRの全交流動力電源喪失のシナリオを選定した。

【事故シナリオの特徴】

- ✓ SBOによりGEが発出される(起因事象発生と同時のため0時間でAL、30分でSE、1時間でGEとなる。)
- ✓ 直流電源(DC)が8時間稼働し(旧基準)、RCICによる注水が継続する(DC枯渇後に停止)

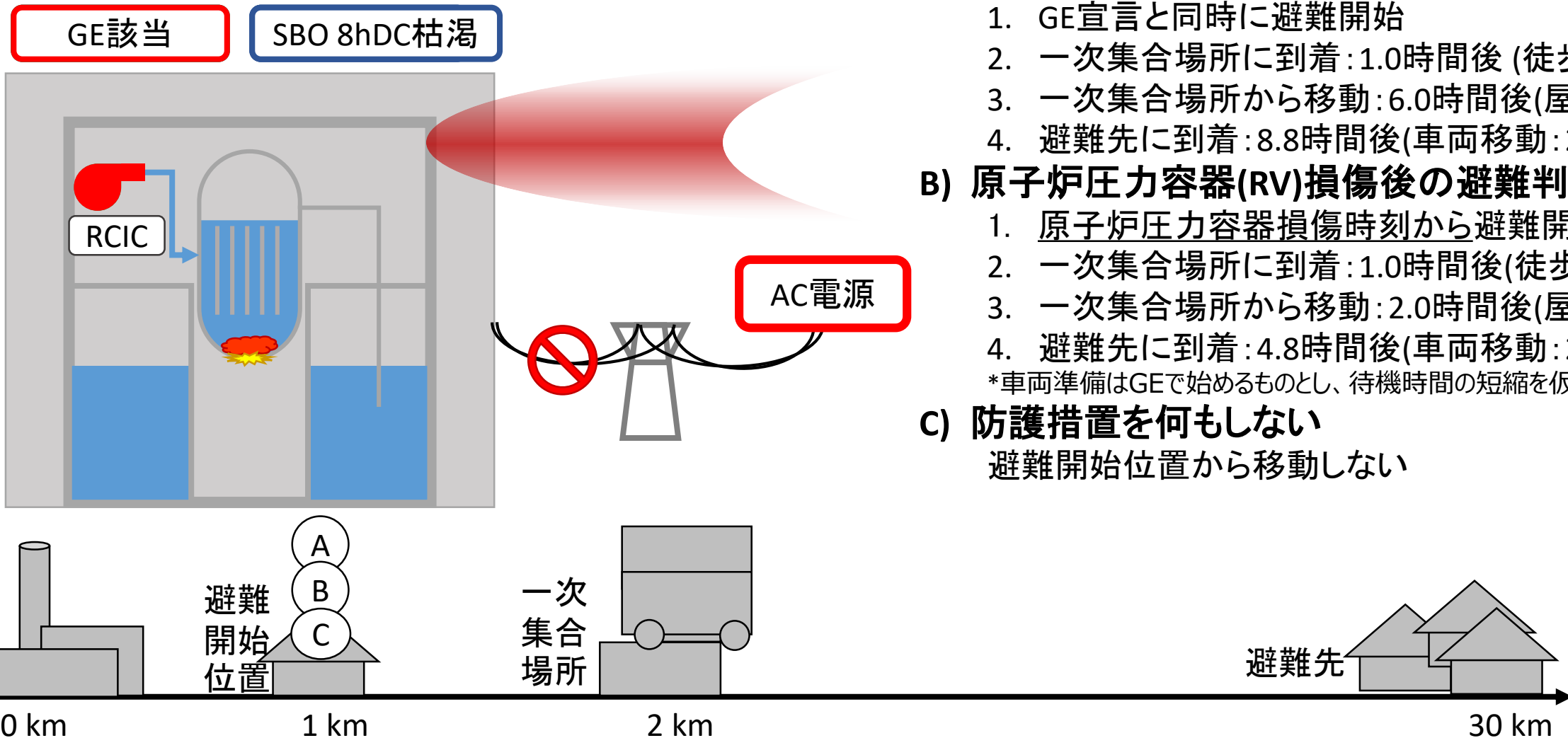
2. 避難のトリガーの選定(避難シナリオの選定)

GE以外の避難のトリガーとして、「原子炉圧力容器損傷」をトリガーとして避難を開始した場合を仮定して、以下の3種類の異なるシナリオを選定した。

- A) GE発出と同時に避難開始
- B) 原子炉圧力容器損傷時点で避難開始
- C) 防護措置を何もしない

3.2 CV損傷までの時間を考慮した防護措置の試解析(3/4)

- 避難シナリオ -



A) GE発出と同時に避難開始 (原災指針に従った避難)

1. GE宣言と同時に避難開始
2. 一次集合場所に到着: 1.0時間後 (徒歩: 1.0h)
3. 一次集合場所から移動: 6.0時間後 (屋内退避: 5.0h)
4. 避難先に到着: 8.8時間後 (車両移動: 2.8h)

B) 原子炉压力容器(RV)損傷後の避難判断

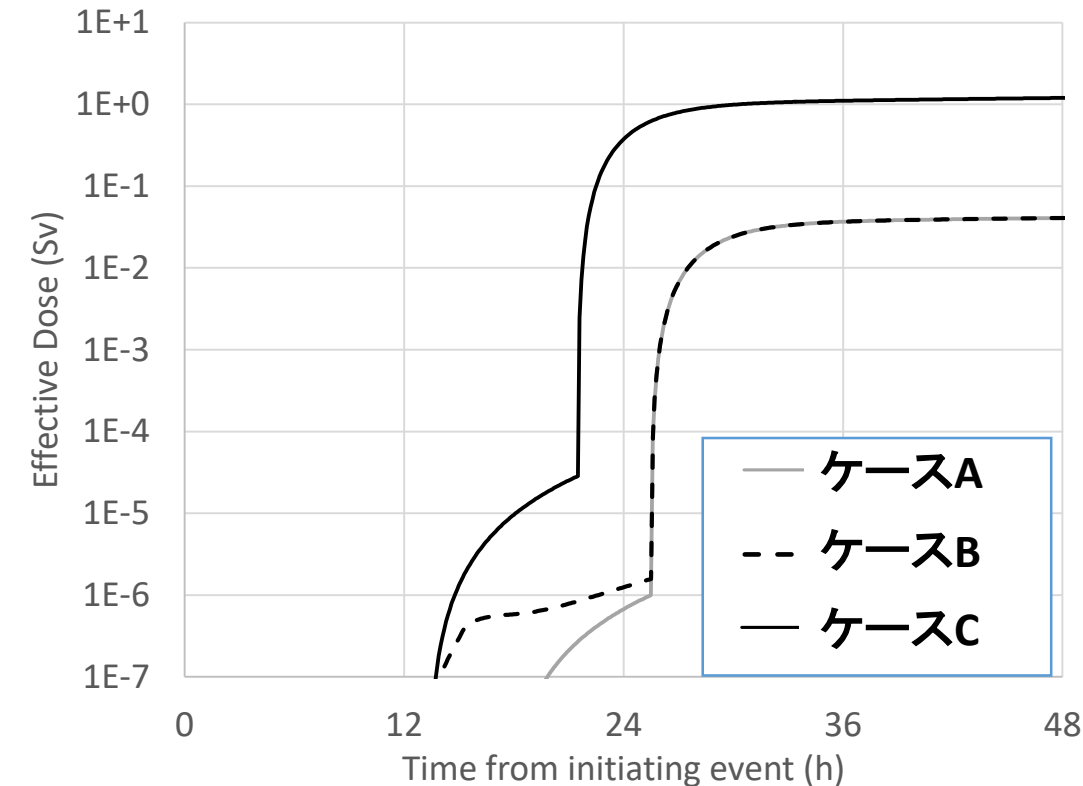
1. 原子炉压力容器損傷時刻から避難開始
 2. 一次集合場所に到着: 1.0時間後 (徒歩: 1.0h)
 3. 一次集合場所から移動: 2.0時間後 (屋内退避: 1.0h*)
 4. 避難先に到着: 4.8時間後 (車両移動: 2.8h)
- *車両準備はGEで始めるものとし、待機時間の短縮を仮定。

C) 防護措置を何もしない

避難開始位置から移動しない

3.2 CV損傷までの時間を考慮した防護措置の試解析(4/4)

- 避難遅れを考慮した被ばく線量計算の結果 -



① 主要な結果の考察

- 避難を想定したケース(ケースA,B)
 - ✓ 被ばく線量はどちらも100 mSv未満
 - ✓ 避難開始を遅らせたことによる影響は小さい
- 防護措置を実施しないケース(ケースC)
 - ✓ 確定的影響が不可避

② 避難遅れによる影響の考察

- ✓ 格納容器損傷までの被ばく線量は防護措置なしでも100 μ Svであった。防護措置が必要な線量ではない。
- ✓ BWRプラントでは代替再循環による格納容器破損防止が検討されており、炉心損傷後に圧力容器損傷及び格納容器機能喪失が回避される可能性がある。

避難位置まで約29kmであり、
4時間程度遅延して線量が上昇

GE発出と同時に避難を開始しなくとも、合理的な避難が可能となる場合がある。

4.まとめと今後の課題

- 防災シナリオの特徴分析を実施し、以下の知見を得た。

時間的な余裕が小さければ、迅速な判断と行動が必要であり、現行の避難の判断は合理的であるといえる。一方で、時間的な余裕が大きければ、事故対策が成功する可能性があること、UPZでの屋内退避の長期化などの負担が増加する可能性があること等の理由から、より合理的なEAL及び防護措置の検討を行う余地があることが分かった。
- 防護措置の試解析を実施し、以下の知見を得た。

現行のGE発出以外の避難のトリガーを用いた避難措置を検討した。解析結果では、ABWRにおいてSBOが発生した場合、原子炉圧力容器の破損をトリガーとして避難を開始した場合においても、合理的な避難が実施できる可能性があることが確認でき、EALの見直しに資する情報を得た。
- 今後の課題として、知見の充填、手法の高度化等のために以下の作業を検討する。
 - ✓ 重大事故等対処設備を考慮したシナリオのグループ化及び特徴的なシナリオの分析
 - ✓ 確率論的リスク評価、詳細な環境影響評価等を用いた手法の高度化
 - ✓ EALの見直しの検討に必要な知見及び参考解析結果の拡張
 - ✓ 他のプラントへの拡張