

レベル3PRA標準の改定とその意義

－レベル3PRA手法の適用例－

2016年3月26日

小倉克規（電力中央研究所）

レベル3PRA分科会

レベル3PRA手法の最近の適用例

- ▶ リスク規制基準との関係（2008年頃）
 - ✓ 南アフリカのコーベルグ（Koeberg）発電所、3ループPWR
 - ✓ サイト内作業従事者及び公衆に対するリスク基準を満足していることを示す。
 - ✓ ECのPC Cosyma及びLLNLのHotSpotを利用
- ▶ マルチユニットサイトのFull-scope Level 3 PRA（実施中？）
 - ✓ 2011年にU.S.NRCスタッフが提案
 - ✓ Vogtle 1及び2号機をパイロットとして実施、4ループPWR
- ▶ State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA)
 - ✓ NUREG-1150以降以降の最新知見及び最新評価手法の適用
 - ✓ Peach Bottom（BWR4、Mark I型）、Surry（3ループPWR）
 - ✓ 多数のプロジェクトに関連した報告書

→レベル3PRA実施基準では、SOARCAに関連する評価手法等を附属書に記載

Full-scope Level 3 PRAについて

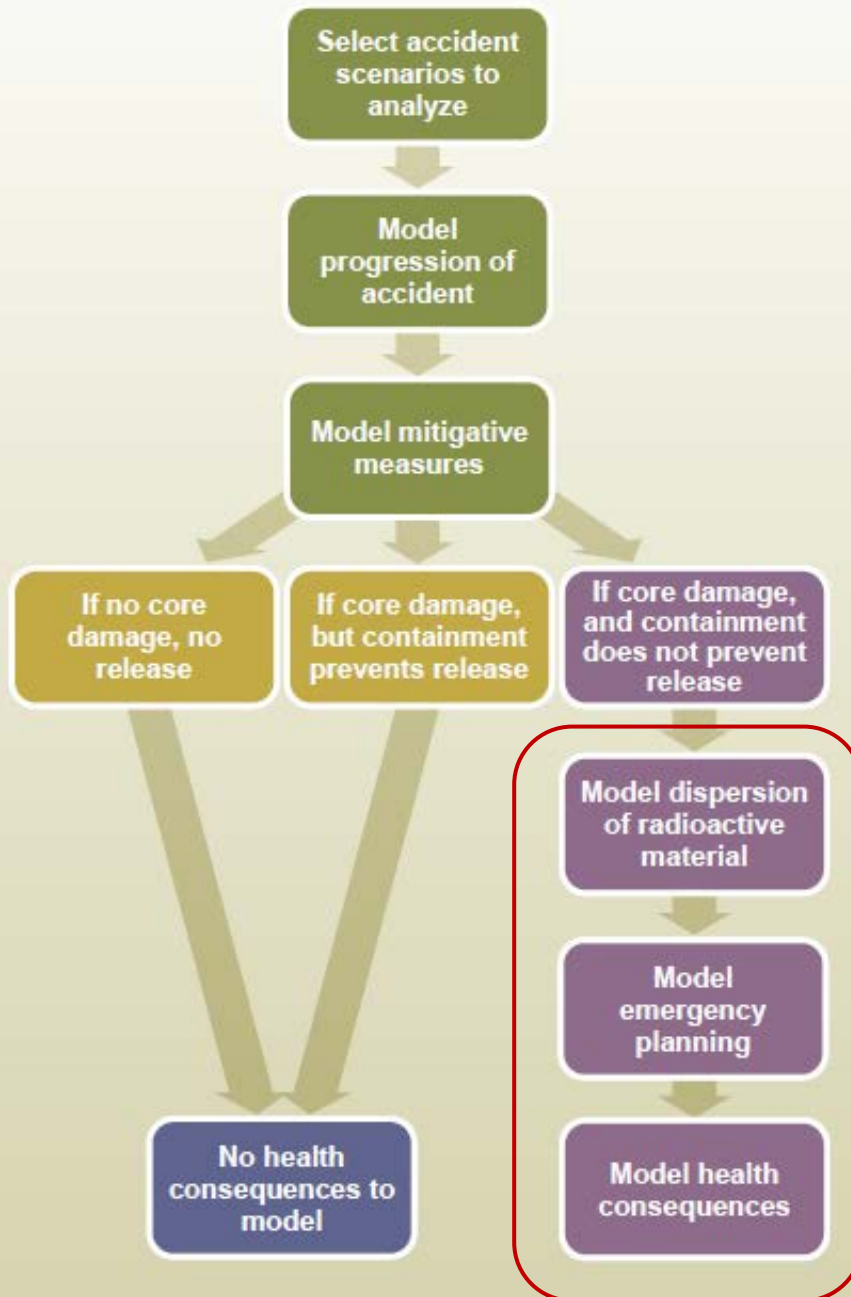
- ▶ 2011年のNRCスタッフによる報告書（SECYレポート）
- ▶ NUREG-1150以降の技術進歩の、研究へのフィードバックがなされていない。大きな技術進歩と考慮すべき点：
 - ✓ プラントの安全性及びセキュリティに関する技術改良
 - ✓ シビアアクシデント現象の理解及びモデル化に関する進歩
 - ✓ 研究及び運転経験を通しての評価手法、解析ツール、データ等の改良
 - ✓ Multi-unitサイトがLevel 3 PRAに与える影響の考慮
 - ✓ 使用済み燃料プール、燃料貯蔵キャスク等のその他の放出源の考慮
- ▶ 以上を考慮した”full-scope comprehensive site Level 3 PRA”を達成するためのプロジェクトを提案
- ▶ Nuclear Energy Institute(NEI)は、NRCの要請を受け、Vogtle 1及び2号機をパイロットに選定
- ▶ 現時点で、公開された技術報告書は見当たらない

SOARCAについて

- ▶ State-of-the-Art Reactor Consequence Analysesの略
- ▶ これまでの保守的な評価（1982 Siting Studyと言われるソースターム）、NUREG-1150のリスク評価等との比較
- ▶ State-of-the-Artと言われる所以：
 - ✓ 最新のプラント固有の、サイト固有の情報に基づくモデル化
 - ✓ 事故時の放射性物質挙動に関する最新知見の反映
 - ✓ 包括的な緊急時対応の考慮
 - ✓ 最近の計算コード及び詳細な解析モデルの適用
- ▶ Peach Bottom（BWR4、Mark I型格納容器）、Surry（3ループPWR、ラージドライ型格納容器）
- ▶ SPAR（事故シーケンス解析）モデル、MELCOR（事故進展解析）及びMACCS2（環境影響評価）計算コードの利用

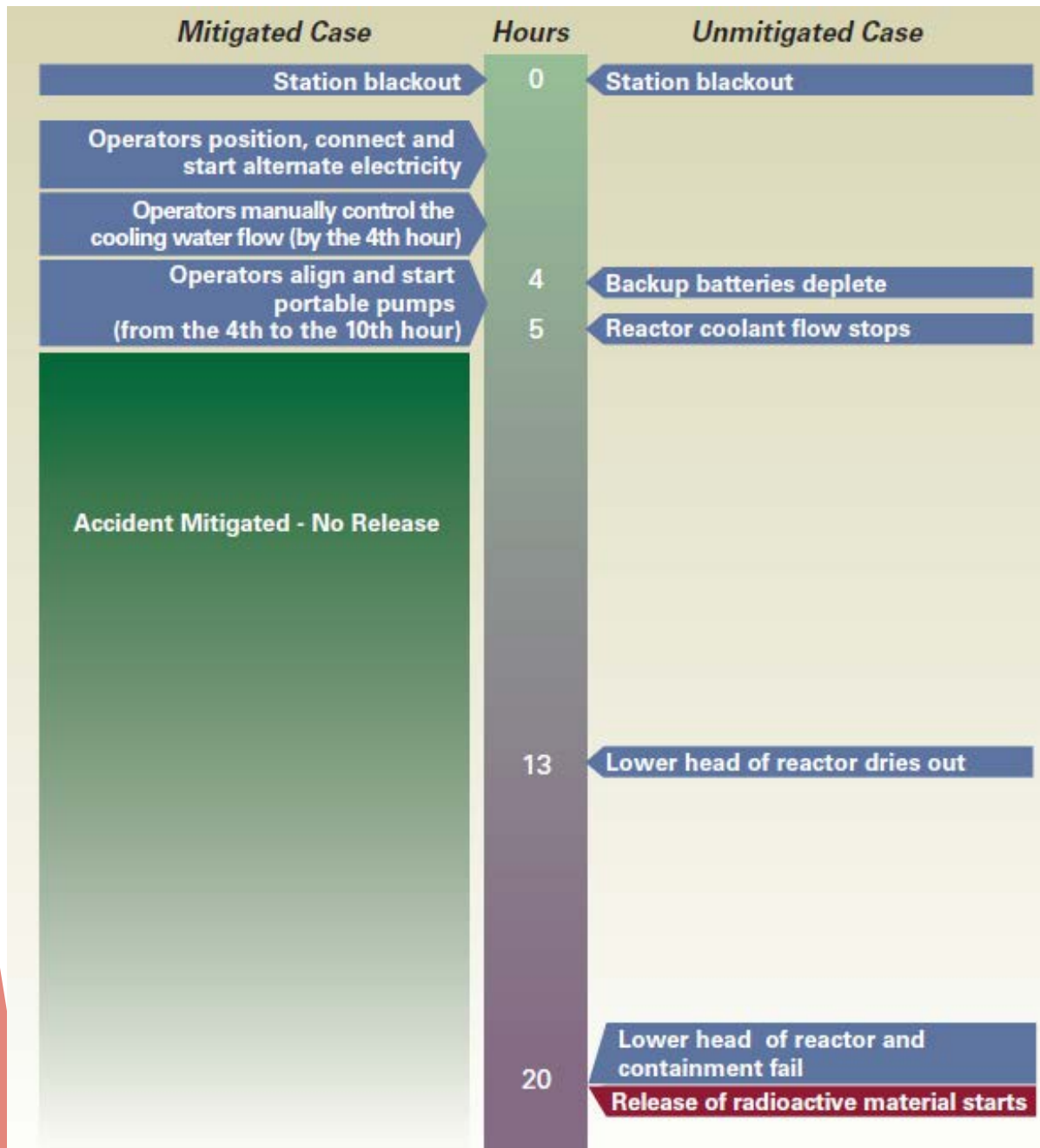
全体構成

一般に、
レベル3PRAと言われる



レベル 1、2 PRAの概要

- ▶ NUREG-1150研究等において、CDFに大きな寄与のある重要な事故シナリオ（ $CDF \geq 1 \times 10^{-6}$ / 炉年）及び格納容器バイパスを含む短期での損傷シナリオ（ $CDF \geq 1 \times 10^{-7}$ / 炉年）を選定し検討
 - ✓ Long-Term Station Blackout (LTSBO) : 地震発生条件下で、全AC電源が喪失するがDC電源により安全系統が作動する。しかし、約4～8時間後にはDC電源も枯渇しSBOに至る。
 - ✓ Short-Term Station Blackout (STSBO) : 地震発生条件下で、全AC及びDC電源が喪失し、全ての安全系統が機能喪失する。 LTSBOよりも強い地震動条件を想定。
 - ✓ Interfacing Systems Loss-of-Coolant Accident (ISLOCA) : Surryのみ考慮。格納容器内高圧系に接続している低圧系配管の、格納容器外の弁がランダム要因で破損する。
 - ✓ Thermally Induced Steam Generator Tube Rupture (TISGTR) : Surryのみ考慮。STSBOから派生する事故シナリオであるが発生確率はより低い。炉心過熱過程で、高温蒸気と水素ガスがSG伝熱管を循環し、伝熱管破損が生じる。

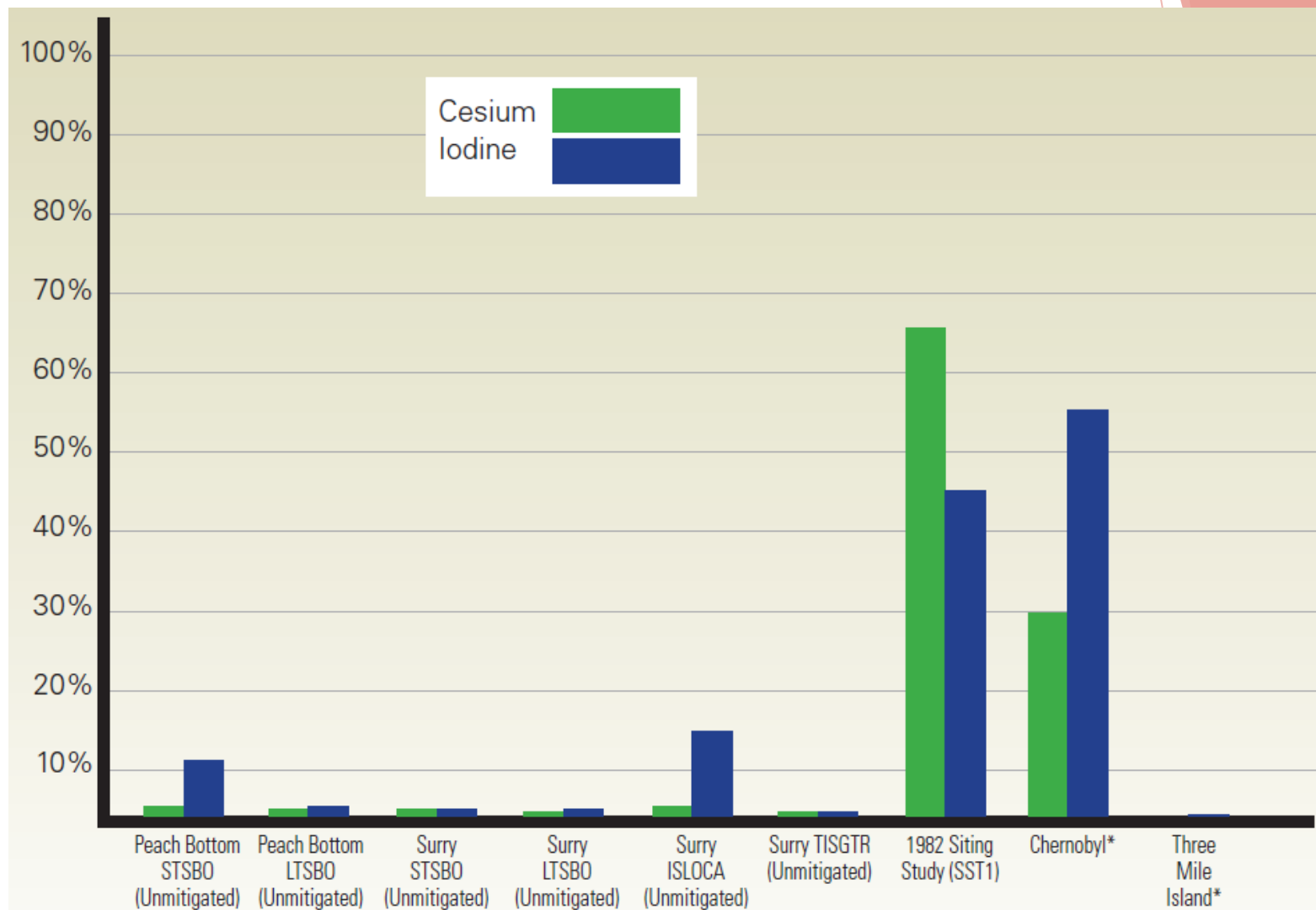


事故緩和機能のモデル化の例

(Peach Bottom, LTSBO)

環境への放出量の比較

事故緩和機能を考慮しない場合の、事故後48時間での ^{131}I 、 ^{137}Cs の環境への放出割合（1982, Siting Studyとの比較）



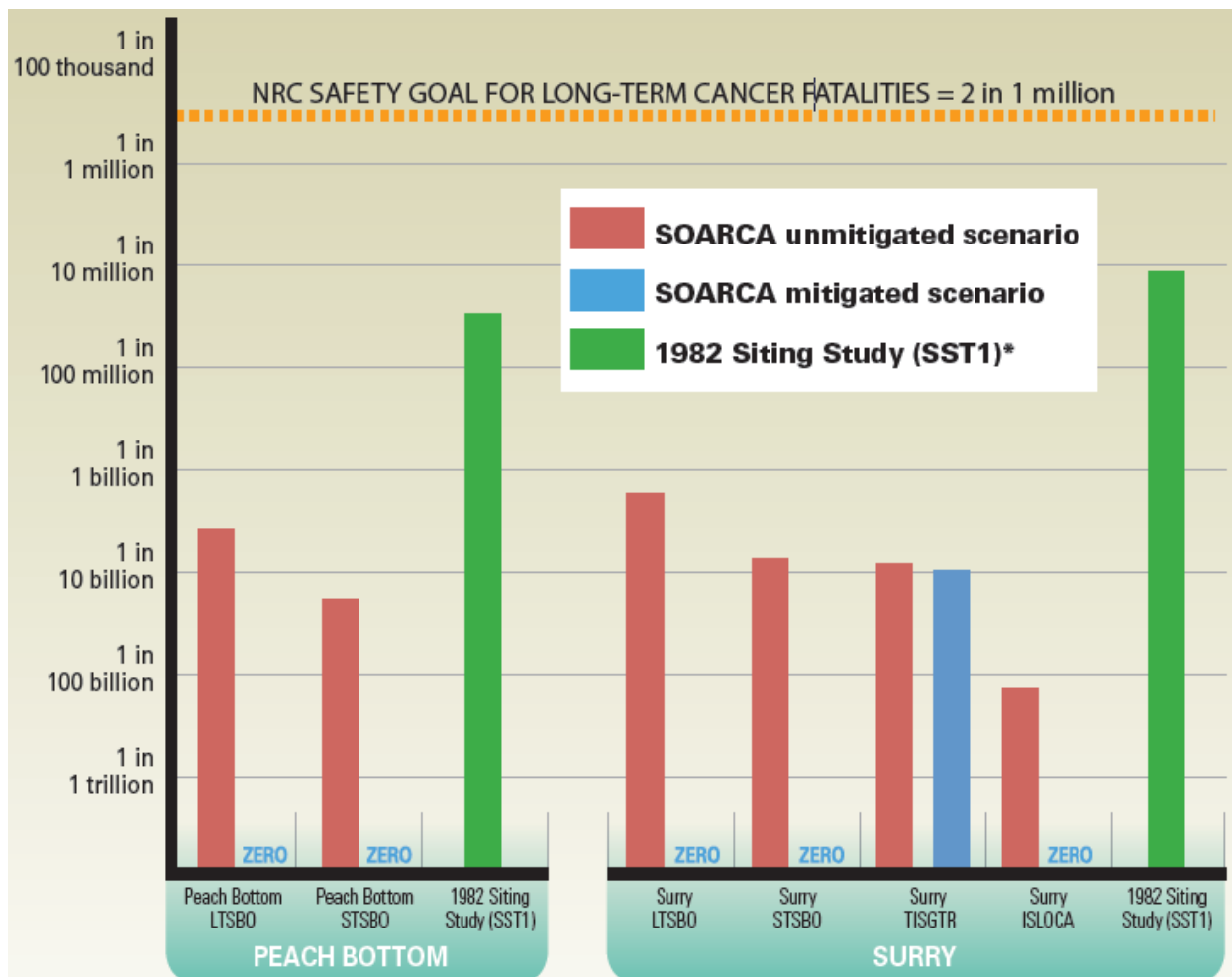
SOARCAにおける最新知見の反映

レベル1、2PRAから得られた結果に加えて：

- ▶ サイト内部及び外部の緊急時計画の反映(NUREG/CR-6953等)
 - ✓ サイト内部：事故開始 1 時間以内での緊急時対応の開始を想定した訓練及びNRCによる検査
 - ✓ サイト外部：敷地外での緊急時計画区域（EPZ：Emergency Planning Zone）を参考とした退避及び避難を含む緊急時対応及び連邦緊急時管理庁(Federal Emergency Management Agency)による2年毎の検査
- ▶ 緊急時計画に基づく避難時間推計（ETE：Evacuation Time Estimate）、詳細な集団避難モデル、被ばく経路別の遮へい係数等
- ▶ 最近の人口統計及び汚染区域からの移転計画
- ▶ 評価物理モデルとして、放出された放射性物質の地表面への沈着量等（NUREG/CR-7161等）

SOARCAの主要な結果

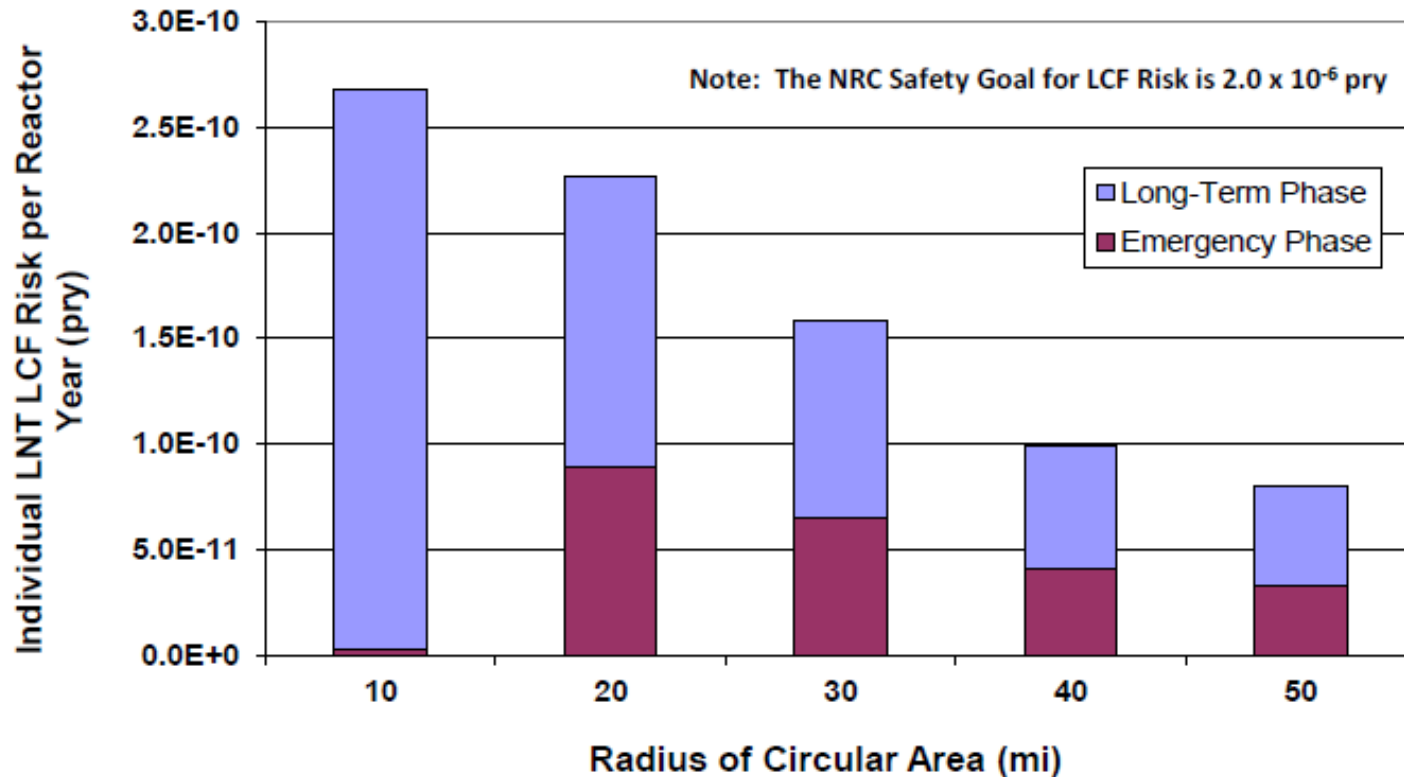
プラントから10マイル圏内の個人の晩発性ガン死亡リスク (1/炉年)



* The 1982 Siting Study did not calculate risk of long-term cancer deaths. Therefore, to compare the 1982 Siting Study (SST1) results to SOARCA's results for risk of long-term cancer death, the SST1 release was put into the MACCS2 code files for Peach Bottom and Surry unmitigated STSBO calculations.

SOARCAの主要な結果(Peach Bottom)

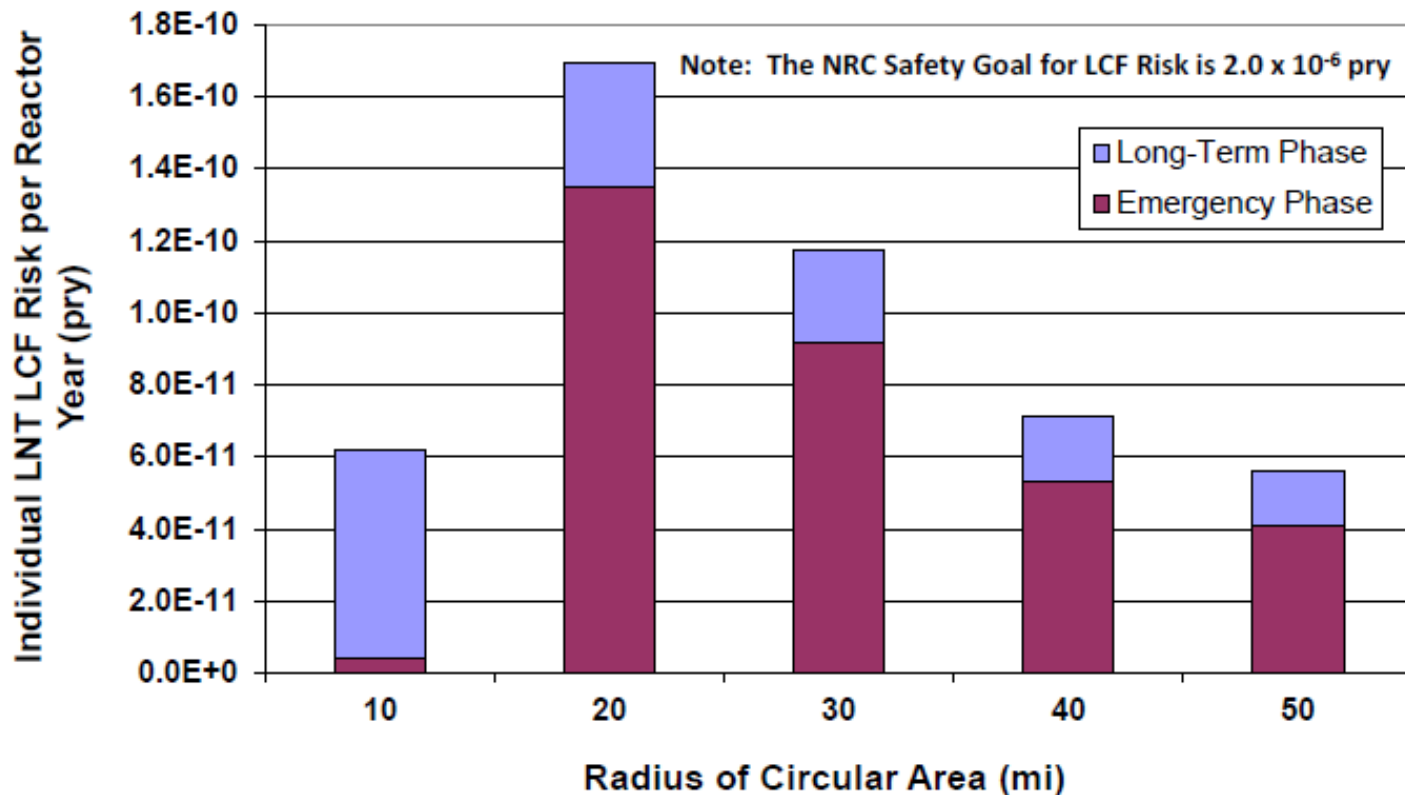
LTSBOにおける、短期の晩発性ガン死亡リスク（10マイル以内避難）と長期リスク（500 mrem/年以下で居住可能）の割合。



Mean, individual, LNT, LCF risk per Reactor-Year (1/yr) from the Peach Bottom, unmitigated, LTSBO scenario for residents within a circular area of specified radius from the plant for the emergency and long-term phases

SOARCAの主要な結果(Peach Bottom)

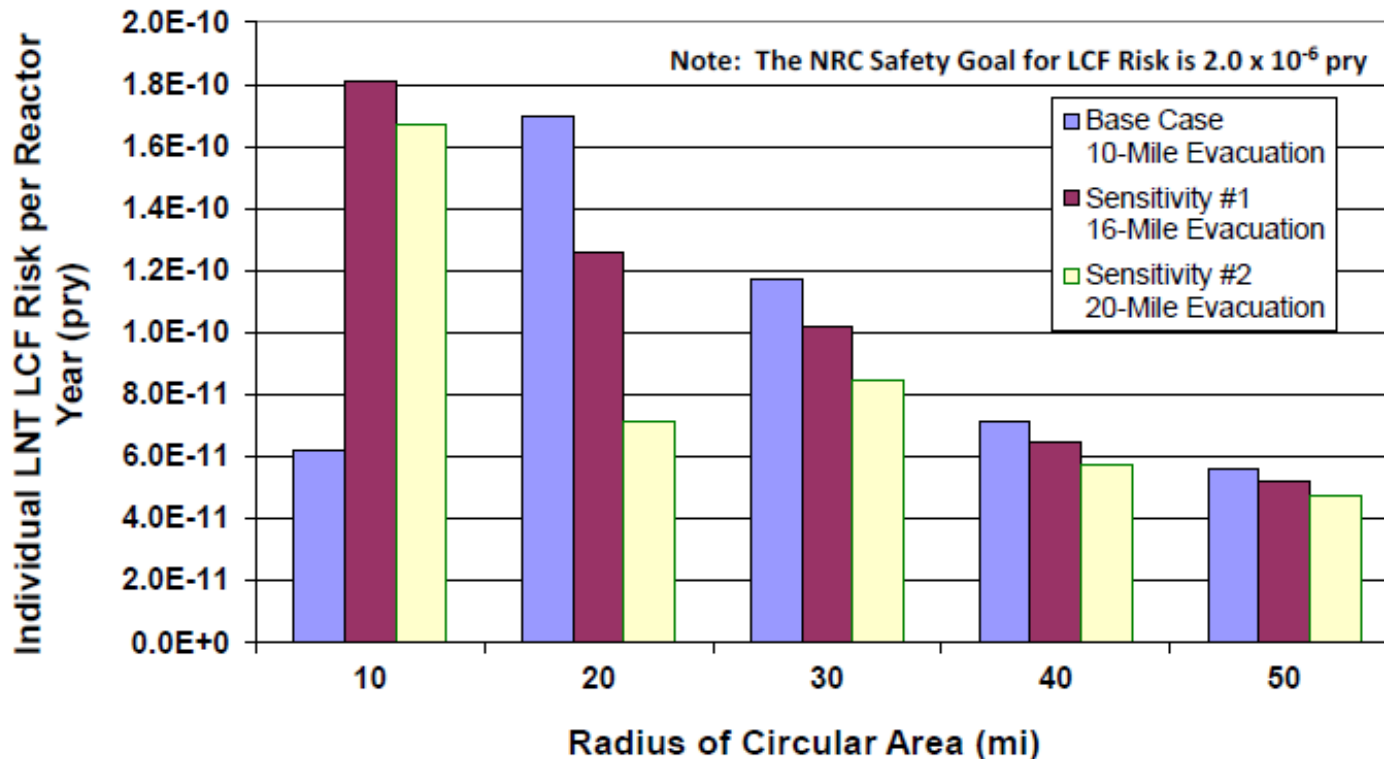
STSBOにおける、短期の晩発性ガン死亡リスク（10マイル以内避難）と長期リスク（500 mrem/年以下で居住可能）の割合。



Mean, individual, LNT, LCF risk per Reactor-Year (1/yr) from the Peach Bottom, unmitigated, STSBO scenario without RCIC blackstart for residents within a specified radius for the emergency and long-term phases

SOARCAの主要な感度結果(Peach Bottom)

STSBOにおける、避難範囲を変えた場合の晩発性ガン死亡リスク

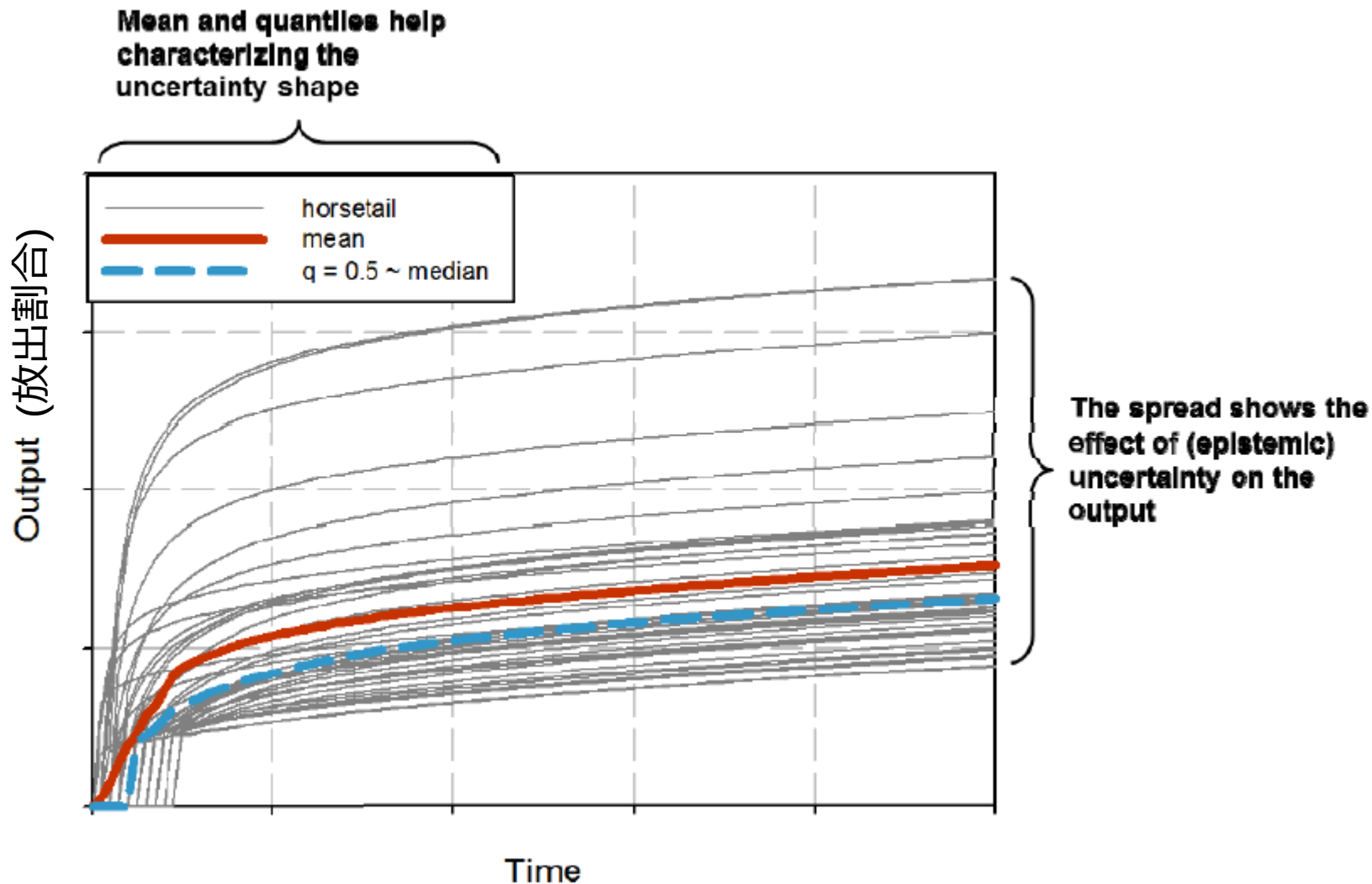


Mean, individual, LNT, LCF risk per Reactor-Year (1/yr) from the Peach Bottom, unmitigated, STSBO scenario without RCIC blackstart for residents within a circular area of specified radius from the plant showing the effect of the size of the evacuation zone

不確実さ評価

- ▶ 感度の高いパラメータの同定と不確実さに関する知見を得る
- ▶ NRCのfull-scope Level 3 PRAプロジェクトの支援、及びNTTF/Tier 3（更に研究が必要）に含まれる福島事故に関する活動の支援
- ▶ 主要事故シナリオに対する不確実さ評価－Peach Bottomに対してはunmitigated LTSBO（NUREG/CR-7155 Draft）、Surryに対しては、unmitigated STSBO（未公刊）
- ▶ MELCOR及びMACCS2による不確実さ伝播解析
- ▶ MACCS2の不確実さ解析で考慮したパラメータの場合（Peach Bottom）：
 - ✓ 乾性沈着速度
 - ✓ 湿性沈着係数
 - ✓ グランドシャイン遮蔽係数
 - ✓ 避難遅れと速度
 - ✓ 短期健康影響に関するパラメータ 等 ⇒ 14のパラメータを対象

不確かさ評価－レベル2PRA



不確実さ評価－レベル3PRA

Table 6.4-2 Conditional, mean, individual LCF risk (per event) regression of MACCS2 sensitivity LNT model at the 10-mile circular area

	Rank Regression			Quadratic			Recursive Partitioning			MARS		
Final R ²	0.71			0.89			0.83			0.81		
Input	R ² inc.	R ² cont.	SRRC	S _I	T _I	p-val	S _I	T _I	p-val	S _I	T _I	p-val
VDEPOS	0.25	0.25	0.63	0.10	0.11	0.6	0.15	0.44	0	0.12	0.28	0
SRVLAM	0.37	0.12	-0.33	0.05	0	1	0.01	0.21	0	0.01	0.34	0
Fuel failure criterion	0.41	0.04	0.21	0.05	0	1	---	---	---	0	0.01	0.6
SRVOAFRAC	0.43	0.02	-0.08	---	---	---	0	0.08	0.04	0	0	1
CHEMFORM	---	---	---	0.03	0.19	0.05	---	---	---	---	---	---
CFRISK Residual	0.51	0.08	0.24	0.01	0.27	0	0.14	0.34	0	0.10	0.33	0
DDREFA Residual	0.53	0.02	-0.14	0	0.12	0.03	0.03	0.02	0.18	---	---	---
GSHFAC Normal	0.60	0.07	0.22	0.02	0	1	0	0.10	0.01	---	---	---
CFRISK Colon	0.65	0.05	0.23	0.07	0.25	0	0.05	0.28	0	0.02	0.05	0.56
CFRISK Lung	0.69	0.04	0.17	0.01	0.06	0.26	0	0.17	0.01	0.02	0.37	0
ESPEED	0.71	0.02	-0.10	0.05	0.05	0.18	0.03	0.07	0.05	0.02	0	1
CFRISK Breast	0.73	0.02	0.11	0.05	0.04	0.47	0	0	1	---	---	---
DLTEVA Cohort 5	0.74	0.01	-0.09	0	0.11	0.05	0	0	1	0.03	0.26	0.01
Pu-239 Inhalation	0.75	0.01	0.10	---	---	---	---	---	---	---	---	---
CZSIGA	0.76	0.01	-0.09	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Te-127m Inhalation	---	---	---	0.05	0.03	0.55	---	---	---	---	---	---
CYSIGA	---	---	---	0	0	1	0.01	0.02	0.46	0.01	0.17	0.08
Nb-95 Inhalation	---	---	---	---	---	---	0	0.07	0	0.03	0	1
Zr-95 Inhalation	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0.03	0	1
I-132 Inhalation	---	---	---	---	---	---	---	---	---	0	0	1

Note: Parameters are grouped by importance and relationship (e.g. MELCOR parameters). Light shading indicates parameters with low importance.

10マイル圏内の晩発性ガン死亡について

⇒4つの回帰分析手法により、重要なパラメータを同定。

SOARCAにおける主要な知見

- 可搬型発電機を考慮すると事故は収束する
SAMGまたはB5bのセキュリティ用機器の活用。但し、TISGTRに対する緩和効果は殆ど無い。
- SOARCAで評価した事故シナリオでは、短期の死亡リスクの寄与はほぼ無い
- 計画及び訓練通りに緊急時計画が実施されれば、公衆の健康影響は低減できることを明らかにした。地震動による橋崩壊、道路信号崩壊等を想定した緊急時対応に関する感度解析では、晩発性ガン死亡への影響は殆ど無い。

但し、今後以下の評価が望まれる。

- 評価例の少ない、PWRアイスコンデンサ型格納容器の評価
- マルチユニットのサイトのリスク評価

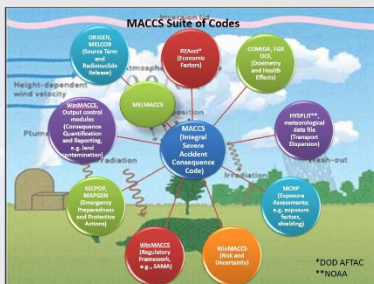
福島事故とSOARCA研究

Peach Bottomに関するSOARCA研究と福島事故：

- 可搬型電源設備を考慮していない
 - RCIC運転時間が短く、炉心損傷までの時間を短く評価（Zr-水反応による水素発生量は増大し、格納容器圧力はより上昇）
- 水素ガス漏洩経路が異なる
 - 格納容器内水素ガスは耐圧強化ベントにより環境へ直接放出（福島事故ではSGTSを経由して3号機から4号機へ流入）
- オフサイト・リソースの利用（津波を考慮せず）
 - 48時間以内には緩和措置の実施が可能（福島では48時間以降に大規模放出）
- 複数基リスクを評価していない
 - 別途研究計画を策定・実施するよう提言
- 使用済み燃料プールのリスクを評価していない
 - これまでの研究によれば、使用済み燃料プールのリスクは低い

WinMACCSの今後の開発方針

MELCOR Accident Consequence Code System Development



MELCOR ACCIDENT CONSEQUENCE CODE SYSTEM SUITE OF CODES

MACCS is a severe accident consequence computer code developed to analyze the offsite consequences of a hypothetical release of radioactive material. The code models atmospheric transport and deposition, weather variability, dose pathways, emergency response, and long-term economic and health impacts.

WinMACCS

- Facilitates the routine use of MACCS and the evaluation of uncertainties.
- Allows for modeling network evacuation using simulated road network for more realistic modeling of protective actions.

MeMACCS

- Preprocessor code that provides an interface between MELCOR and MACCS to extract and evaluate the required source term data for a consequence analysis.

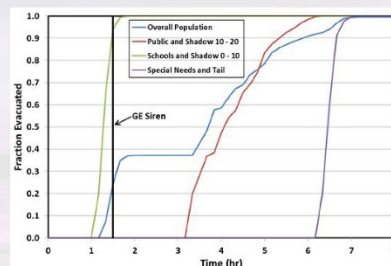
SecPop

- Code that generates site data by accessing population, land use, and economic value databases and uses algorithms to map the data onto a user-defined computational grid.

Other Code Utilities

- COMIDA2 for the food-chain pathway
- Latin Hypercube Sampling (LHS) to sample uncertain inputs
- Combine Source to perform multi-unit consequence analyses

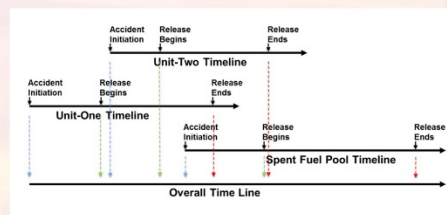
RECENT CODE DEVELOPMENT



Fraction of Population Exiting Emergency Planning Zones for Example Long-Term Station Blackout Scenario

Tracking Population Movement

- The timing of evacuating cohorts crossing boundaries can be evaluated to verify consistency with the evacuation time estimate.



Multi-Source Releases

- Allows releases from multiple units with independent accident initiation times, release timelines, and isotopic inventories.
- Support for multi-unit source terms and multi-ring spent fuel pool source terms.

Parameter Modifications for Early Phase

- Modified parameter upper bounds to allow for emergency phases lasting longer than 1 week.

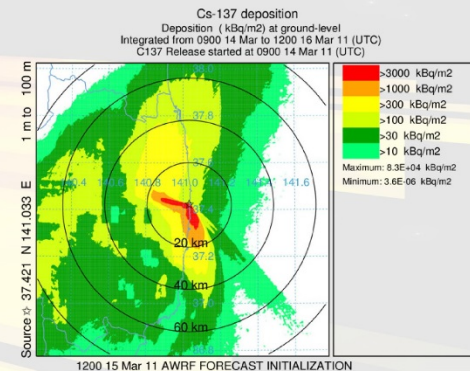
ONGOING CODE DEVELOPMENT

New Optional Atmospheric Transport Model

- Integration of HYSPLIT (from National Oceanic and Atmospheric Administration) with MACCS.

Alternative Economic Consequences Model

- Estimates the offsite cost impact from business disruption using current state-of-practice economics based on gross domestic product.
- Considers the impact on the local and regional communities, industries, and infrastructure.
- Considers indirect effects on the national economy outside the directly affected region.



HYSPLIT Model of Cs-137 Deposition from Early Release Data

“Overview of Recent MACCS Developments,” Regulatory Information Conference 2016 (RIC2016), Office of Nuclear Regulatory Research, USNRC, Mar 2016.

Caution: The NRC does not use modification code stickers. You must not scan or use a QR code if it appears to be manipulated or modified in any way or appears not to be part of the original printing of the material.

