



資料2

第3回意見聴取会資料

原子炉注水に係る クロスチェック解析 (最終報告)

2011年12月9日 (独)原子力安全基盤機構



目 的

東京電力株式会社(以下、「東電」という。)が提出した「 福島第一原子力発電所第1~4号機に対する「中期的安全 確保の考え方」に基づく施設運営計画に係る報告書(その 1)(改訂)」(以下、「報告書」という。)に関する<u>原子炉注水</u> 異常時の炉内構造材温度評価、核分裂生成物の放出量 評価及び環境影響評価に用いた、解析条件、計算過程及 び解析結果の妥当性について確認する。

なお、JNES基本解析については、従来の解析(再注水 温度100℃)を「基本解析2」とし、原子力安全・保安院から の要請で再注水温度50℃とした解析を追加し、「基本解析 1」とした。



クロスチェック解析の概要(1/2)

	炉内構造材温度評価	放出量評価	環境影響評価
基本解析 JNESが最も妥当であると 判断した解析条件を用い た解析。 判断のめやすとの比較を 行い、評価の妥当性を確 認する。	RELAPモデルを用いた温度 評価(3事象(過渡相当、事 故相当、SA相当)) ・燃料、RPV胴部、上部構 造材の相互の輻射を考慮し 温度挙動を評価	JNES基本解析で得られた 温度分布を用いた放出量 評価(3事象) ・温度評価で最も温度の 高い部位 ・蒸気圧曲線はJNES整 備の熱力学データベース	JNES基本解析で得られた放 出量を用いた線量評価(3事 象) ・相対濃度及び相対線量は JNESで計算
感度解析 入力条件が結果に及ぼす 影響を確認するための解 析	・上部構造材からRPVへの 輻射を考慮し、構造材温度 上昇への影響を確認(SA相 当事象のみ)。 ・初期燃料温度を変化させ て構造材温度上昇への影響 を確認(SA相当事象のみ)。 ・燃料の存在位置の影響(<u>委員コメント対応)</u> →燃料の存在位置(RPV下 部と炉心支持板の上)を変 化させて、結果に対する影 響を確認する。(SA相当事 象のみ) ・注水温度を変化させて構 造材温度上昇への影響を確 認(SA相当事象のみ)。	・上部構造材からRPVへ の輻射考慮、初期燃料温 度及び燃料の存在位置の 温度評価における温度プ ロファイル及び発生蒸気 量に基づき放出量を評価 ・セシウム放出源の検討 (燃料内部に残存するセシ ウムからの放出) ・蒸気圧曲線はJNES整 備の熱力学データベース(SA相当事象のみ)	 ・降雨の影響(委員コメント 対応) →乾性沈着のみを考慮した 場合と湿性沈着と乾性沈着 を両方考慮した場合の計算 を行い、結果に対する影響を確認する。(SA相当事象のみ) ・吹き上げ高さの影響(委員 コメント対応) →浮力による上昇を考慮した 場合と考慮しない場合の計算を行い、結果に対する影響を確認する。(SA相当事象のみ) ・実効放出継続時間を変更した た場合の結果に対する影響を確認(SA相当事象のみ)

青字:意見聴取会での委員コメント対応

3



クロスチェック解析の概要(2/2)

	炉内構造材温度評価	放出量評価	環境影響評価
参考解析 事業者評価の妥当性を確 認するための解析	事業者モデルと同等のモデ ルを用いたRELAPコードに よる温度評価(3事象)	事業者と同様の温度分布 及び蒸気量を用いた放出 量評価(3事象) ・上部構造材 ・事業者が用いた蒸気圧 曲線	事業者と同様の放出量及 び相対濃度・相対線量を用 いた評価(3事象)



I.炉内構造材温度評価

- 1. 解析内容と条件
 - 1.1 解析内容
 - 1.2 注水停止時のプラント挙動
 - 1.3 計算全体の流れ
 - 1.4 温度評価モデル(JNES vs. 事業者比較)
 - 1.5 RELAPコードノード図
 - 1.6 再注水時冷却モデル(JNESと事業者の相違)
 - 1.7 福島第一注水停止事象(解析条件)
- 2. 基本解析結果
 - 2.1 基本解析1(シビアアクシデント相当 注水停止12時間 注 水温度50℃)
 - 2.2 基本解析2(シビアアクシデント相当 注水停止12時間 注 水温度100℃)



- 3. 参考解析結果
 - 3.1 JNES参考解析モデル(事業者再現)
 - 3.2 参考解析(シビアアクシデント相当 注水停止12時間)
 - 3.3 要因分析(輻射形態)
 - 3.4 要因分析(注水冷却モデル)
- 4. 感度解析結果
 - 4.1 感度解析(上部構造材からRPV上部壁への輻射の考慮)
 - 4.2 感度解析(初期温度)
 - 4.3 感度解析(燃料位置)
 - 4.4 感度解析(注水温度による発生蒸気流量へ影響)
- 5. まとめ



1. 解析内容と条件

1.1 解析内容

冷温停止達成後、注水が停止し、冷却材が無くなると、燃料の崩壊熱による輻射伝熱により炉内構造材温度が上昇する。
 このため、詳細な輻射伝熱解析モデルを有するRELAP5/
 MOD3.3コードを用いて炉内構造材の温度上昇を評価し、その妥当性を確認する。



1.2 注水停止時のプラント挙動



・注水停止後、直ぐに保有水が無くなり、構造材は輻射により加熱される。・注水再開後はCsが蒸気によって放出される。



1.3 計算全体の流れ





1.4 温度評価モデル(JNES vs. 事業者比較)



JNESモデルでは、輻射経路を考慮し、燃料、側部構造材、上部構造材の温度挙動を評価



1.5 RELAPコードノード図





1.6 再注水時冷却モデル(JNESと事業者の相違)

全体(燃料)のエネルギーバランスの式

$$M_{core} Cp_{core} \frac{dT_{core}}{dt} = Q_{decay} - (Q_{rad}_{us} + Q_{rad}_{s}) - Q_{vap}$$

JNES : $Q_{vap} = h \cdot A(T_{core} - T_{wtr})$
事業者 : $Q_{vap} = W \cdot h_{fs}$
 M_{core} : 炉心燃料重量
 h_{fs} : 水の蒸発潜
 h_{fs} : 水の蒸発

上部構造材のエネルギーバランスの式

$$M_{us}Cp_{us}\frac{dT_{us}}{dt} = Q_{rad_us} - Q$$

JNES : $Q = h \cdot A(T_{us} - T_{stm})$
事業者 : $Q = W \cdot Cp_{stm}(T_{us} - T_{stm})$
正書

エネルギーバランスにおける注水冷却の取り扱いが異なる。



1.7 福島第一注水停止事象(解析条件)

	基本解析 1	基本解析 2	感度解析	参考解析	事業者解析		
プラント							
対象事象		過渡相当 事故相当 シビアアク	(注水保 (注水保 シデント相当 (注水保				
解析条件•想定 崩壞熱 水位 初期温度	0.88MW(2011.10.17) 停止時に瞬時に水位0mm 100℃(構造材)、150℃(燃料)						
再注水流量 再注水温度 発生蒸気量(キ ャリア蒸気)	20m³∕h(水) 50℃ RELAP評価値	20m³/h(水) 100℃ 0.652m³/s(崩壊熱÷ 蒸発潜熱÷密 度)	←	→	20m³/h(水) 100℃ (8.9m³/s蒸気∶注水流量相 当)		
解析コード	RELAP5MOD3.3				報告書記載式		
輻射モデル	3体間輻射 ・溶融燃料形状 :円盤 ・上部構造材平板:円盤 ・側部構造材 :中空円柱 (内径:シュラウド,厚み:RPV)		基本解析とベース条件は 同じとし、下記をサーベイ ・RPV上部への輻射追 加 ・燃料配置サーベイ ・燃料初期温度サーベ イ	平行平板相 当 2体間輻射 ×2	平行平板相当 2体間輻射×2		
物性値 比熱 熱伝導率	燃料:温度依存(UO ₂) 構造材:温度依存 燃料:温度依存(UO ₂ +SUS+Zry)		←	→	燃 料:0.4kJ/(kg-K) 構造材:0.511kJ/(kg-K) 未使用		



2.1 基本解析1 (シビアアクシデント相当 注水停止12時間 注水温度50℃)





2.2 基本解析2 (シビアアクシデント相当 注水停止12時間 注水温度100℃)







RELAPコードで、事業者解析を再現



3.2 参考解析(シビアアクシデント相当 注水停止12時間)





3.3 要因分析(輻射形態)





3.4 要因分析(注水冷却モデル)



事業者モデルでは再注水後の温度低下が速い。



4. 感度解析結果



4 感度解析項目

(1)上部構造材からRPV上部壁への輻射を考慮

上部構造材温度をより詳細に評価するため、上部構造材と向かい合う RPV上部壁への輻射を考慮。

(2)燃料初期温度

基本解析では燃料初期温度を150℃と仮定しているが、燃料初期温度には不確実さがあるため、初期温度に対する感度を確認。

(3)燃料位置

基本解析では燃料位置は下部プレナムと仮定しているが、燃料の一部が 炉心支持板上に堆積しているとして、構造材温度を確認。

(4) 注水温度による発生蒸気量への影響評価

放射性物質の放出量の評価では放出蒸気量を使用する。この放出量は注水温度の影響を受けるため、感度解析を実施する。



4.1 感度解析(上部構造材からRPV上部壁への輻射を考慮)





4.2 感度解析(初期温度)





4.3a 感度解析(燃料位置)





4.3b 感度解析(燃料配置)





4.4a 感度解析(注水温度による発生蒸気流量への影響)





4.4b 感度解析(注水温度による発生蒸気流量への影響)





5. まとめ



5. 解析結果のまとめ

■事業者解析の妥当性 ・輻射形態を厳しめに設定しているため構造材温度を高く見積もる。 →保守的な評価と考えられる •再注水後の温度は蒸気冷却モデルにより急速に低下する →非保守的な評価と考えられる ☆総合的な保守性を核分裂生成物放出量、線量評価で検討 ■参考解析 •再注水開始前の温度挙動は同等な輻射モデルを用いるとJNESと事業 者解析は一致。 ■感度解析 •上部構造材からRPV上部壁への輻射:影響はほとんどない。 :初期温度に対して構造材温度は若干変化。 ●燃料初期温度 : 炉心支持板上に燃料が多くある方が構造材温度 •燃料位置 が若干上昇。 •注水温度による発生蒸気流量への影響: 蒸気発生量は注水温度に対して感度があり、 60°C以下では崩壊熱による蒸気は発生しない。







- 1. 核分裂生成物の放出量評価
 - 1.1 基本解析の解析条件及び解析結果
 - 1.2 参考解析の解析条件及び解析結果
 - 1.3 感度解析の解析条件及び解析結果

2. 環境影響評価

2.1 基本解析の解析条件及び解析結果2.2 参考解析の解析条件及び解析結果2.3 感度解析の解析条件及び解析結果

3. まとめ



1.核分裂生成物の放出量評価

- 福島第一原子力発電所3号機の原子炉注水に異常があった場合に、圧力容器の上部構造材等に付着しているセシウム(化学形態はCsOH)が温度上昇に伴い蒸発し、環境へ放出される量を評価する。(燃料から放出されたセシウムは燃料よりも温度の低い圧力容器内壁・構造材等に沈着しているものと想定)
- 圧力容器内部の温度は、一様で上部構造材等の放出源と 等しく、セシウム濃度は圧力容器内において平衡状態を仮 定する。
- 蒸発したセシウムは、崩壊熱相当の蒸気によって圧力容器 外へ漏えいし、環境へ放出されるとする。



<u>セシウムの放出量評価に用いた計算式</u>

$$M_{CSOH} = \frac{P_{CSOH} \cdot V_g}{R \cdot T}$$

$$C_{CsOH} = \frac{M_{CsOH}}{V_g + V_{grav} \cdot A_{grav} + V_{dif} \cdot A_{dif}}$$

- -

$$M_{leak} = C_{CsOH} \cdot V_g$$

$$M_{CsOH}$$
:セシウム(CsOH)発生量(Bq/s) P_{CsOH} :セシウム(CsOH)飽和蒸気圧(Pa) V_g :崩壊熱相当の蒸気流量(m³/s) R :気体定数(8.3 J/(mol-K)) T :放出源の温度(K) C_{CsOH} :セシウム(CsOH)平衡濃度(Bq/m³) V_{grav} :重力沈降速度(1.65×10⁻⁵m/s) A_{grav} :ゴラウン拡散沈着速度(1.3×10⁻⁵m/s) A_{dif} :ブラウン拡散沈着面積(14,500m²) M_{leak} :セシウム(CsOH)放出量(Bq/s)



1.1 基本解析の解析条件及び解析結果

- 基本解析では、セシウムの飽和蒸気圧曲線はJNESが 整備したものを用いた。
- 放出源の温度については、JNESの基本解析結果から、 圧力容器内部で最も温度が高くなる部位とし、RELAP コードを用いた炉内構造物内の温度評価結果を用いた。










- シビアアクシデント相当事象では、発生蒸気量が少ないこと と放出源の温度が事業者解析(14頁及び15頁参照)に比べ て低いため、セシウムの大気中放出量が小さい結果となった。

表2.1 セシウムの大気中放出量の基本解析結果

事象	核種	JNES基本解析 1	JNES基本解析 2	事業者解析
シビアアクシ デント相当	Cs-134 Cs-137	約2.9×10 ⁸ Bq 約2.6×10 ⁸ Bq	約1.8×10 ¹⁰ Bq 約1.6×10 ¹⁰ Bq	約4.0×10 ¹¹ Bq 約3.5×10 ¹¹ Bq
蒸気発生量		50℃注水での RELAP解析結果	崩壊熱相当	注水量相当



JNES基本解析1(シビアアクシデント相当)





5.0x10⁹

0.0

JNES基本解析2(シビアアクシデント相当)



時間(h)





1.2 参考解析の解析条件及び解析結果

- 参考解析では、セシウムの飽和蒸気圧曲線は事業者のもの を用いた。
- 放出源は、事業者同様、上部構造材とし、その温度は事業 者と同じ値を用いた。

表2.2 セシウムの大気中放出量の参考解析結果

事象	核種	JNES参考解析	事業者解析
シビアアクシデント	Cs-134	約4.0×10 ¹¹ Bq	約4.0×10 ¹¹ Bq
相当	Cs-137	約3.5×10 ¹¹ Bq	約3.5×10 ¹¹ Bq





1.3 感度解析の解析条件及び解析結果

1.3.1 温度評価の感度解析に基づく評価

- セシウムの飽和蒸気圧曲線はJNESが整備したものを用い た。
- 放出源の温度については、JNESの基本解析結果から、圧 カ容器内部で最も温度が高くなる部位とし、RELAPコードを 用いた炉内構造物内の温度評価結果を用いた。



表2.3 セシウムの大気中放出量の結果 (温度評価の感度解析に基づく評価)

		上部構造材最高温 度(℃)	Cs-134(Bq)	Cs-137(Bq)
JNES基本解析1 (シビアアクシデント相当)		約209	約2.9×10 ⁸	約2.6×10 ⁸
JNES基本解析2 (シビアアクシデント相当))	約180	約1.8×10 ¹⁰	約1.6×10 ¹⁰
JNES 感度解析				
上部構造材からRPV上部壁への輻 射を考慮		約169	約1.7×10 ¹⁰	約1.5×10 ¹⁰
燃料初期温度	100°C	約163	約9.0×10 ⁹	約8.0×10 ⁹
	200°C	約179	約3.5×10 ¹⁰	約3.1×10 ¹⁰
「「「「「」」「「」」「」」「」」「」」「」」「」」「」」「」」「」」「」」「	30%	約200	約6.8×10 ¹⁰	約6.0×10 ¹⁰
割合	50%	約210	約2.5×10¹¹	約2.2×10 ¹¹
	70%	約220	約4.7×10 ¹¹	約4.1×10 ¹¹
事業者(シビアアクシデント相当)		約300	約4.0×10 ¹¹	約3.5×10 ¹¹

事業者の解析結果は非現実的な感度解析結果とほぼ同等



1.3.2 セシウムの放出源の検討

- 福島第一原子力発電所3号機の原子炉注水に異常があった場合に、圧力容器内部の燃料温度が上昇し、環境へ放出されるセシウム量を評価する。
- セシウムの放出源としては以下を考慮
 燃料内部に残存するセシウム
 原子炉圧力容器内壁に沈着したセシウム
- 原子炉圧力容器内壁から再蒸発したセシウムは、崩壊熱相
 当の蒸気によって圧力容器外へ漏えいし、環境へ放出されるとする。
- セシウムの飽和蒸気圧曲線はJNESが整備したものを用いた。
- 燃料の温度は、JNESの基本解析結果を用いた。



燃料及び構造材の温度(SA相当 注水停止12時間)





燃料からのFP放出モデル



Table 10 Comparison of Cs release at the end of SFD 1-4 test between analysis and measurement

	SFD1-4 Measurement	CORSOR	CORSOR-M	ORNL-Booth	$1/\sqrt{P}$ CORSOR-M
Cs fractional release (%)	Cs-137: 51 ± 15 Cs-134: 39 ± 14	83	72	60	40

出典: A. Hidaka, "Outcome of VEGA Program on Radionuclide Release from Irradiated Fuel under Severe Accident Conditions," J. Nucl. Sci. Technol., 48(1), pp.85-102 (2011).





<u>(1)燃料からのセシウムの放出量評価</u>

CORSOR-Mモデル*を用いて燃料からのセシウム放出量を評価

$$\dot{f} = k_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

f :放出率(fraction/min)
$$k_0$$
 :係数(1/min)
Q :活性化エネルギー(kcal/mol)
T :温度(K)
R :1.987x10⁻³ (kcal / (mol K))

Csの放出量評価にはMELCORコードのデフォルト値**を使用 *k*_{0,Cs}:2.0 x10⁵ min⁻¹ Q_{Cs}: 63.8 kcal/mol

* M. Kuhlman, et al., "CORSOR User's Manual," BMI-2122, NUREG/CR-4173 (1985)

** R. Gauntt, et al., "MELCOR Computer Code Manuals," NUREG/CR-6119 (2000)



(参考)CORSORーMモデルの妥当性



from all HI tests with CORSOR-M



出典: A.L. Wright et al., "Primary System Fission Product Release and Transport," NUREG/CR-6193, NEA/CSNI/R(94)2, ORNL/TM-12681, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, June 1994

大部分が該当

が100%放出

VEGA-3実験ではCs



VEGA実験の試験燃料との比較

福島第一原子力発電所の燃料

① 高温になり溶融・デブリ化してセシウムが放出された燃料



VEGA実験の検証結果を参考





VEGA実験

Test No.	VEGA-1	VEGA-2	VEGA-3	
Test Date	'99/9/9	'00/4/18	'00/10/3	
Test Fuel	Two pellets irradiated in Takahama-3 (burn-up 47GWd/t)			
Cladding	w/o	w/o	w/o	
Re-irrediation	No	No	No	
Max. Temperature	2773 K	2773 K	3123 K	
Pressure	0.1 MPa	1.0 MPa	0.1 MPa	
Carrier Gas	Не	Не	He	
Remarks	Base case	High-press.	High-temp. (Fuel melting)	

Table 1VEGA Test Matrix

Table 4 Comparison of Final Fractional Releases (VEGA-1)

Nuclides	Exp. (%)	Cal.* (%)
Cs-137	86±0.1	• 100
Sb-125	89±2.1	98
Ru-106	5±4.1	0

*; Calculated by VICTORIA2.0 with ORNL-Booth model

Boothモデルでの評価結果は実験結果より もやや保守的
Boothモデルよりも保守的な評価が得られ るCORSOR-Mモデルが適当
モデル適用の不確定性を考慮して、放出量 を10倍とする

出典:日高、他、「VICTORIA2.0コードを用いた燃料からの放射性物質放出に関するVEGA-1及び-3実験解析」、 JAERI-Research 2005-001





基本解析1(シビアアクシデント相当 注水停止12時間)のRELAP解析結果に基づき Cs-134の燃料内部からRPV内部への放出量を評価 →1F3の燃料にCORSOR-Mモデルを適用する不確定性を考慮して、RPV内部への放出量は 計算結果の10倍を想定

^{*} IAEA6月報告書記載の3号機の解析結果(事業者解析2)では、燃料内に残存するCsの初期インベントリに対する割合は約0.8%。





前項で評価されたRPV内部に放出されたCsが蒸気流によって環境へ放出される量を評価 RELAP解析結果の蒸気流量を使用

- → 環境への放出量は10⁵Bqオーダー
- → 沈着したCsの再蒸発による放出量(10⁸~10¹⁰Bqオーダー)に比べて十分低い
- → 今回の放出量評価から除外

^{*} IAEA6月報告書記載の3号機の解析結果(事業者解析2)では、燃料内に残存するCsの初期インベントリに対する割合は約0.8%



燃料からの放出量評価のまとめ

- •燃料内にセシウムが残存する場合を考慮
- •燃料内からのセシウム放出量の評価にCORSOR-Mモデルを適用
- セシウムを内包する燃料は溶融に至らなかったと考えられ、既往の試験(VEGA実験)と類似の条件
- •CORSOR-Mモデルを用いた保守的な評価では、燃料からRPV内 への放出量は約10⁶Bq
- •環境への放出量は~10⁵Bq程度であり、再蒸発による環境への放出量(10⁸~10¹⁰Bq)に比べて十分低い



2.環境影響評価

大気中に放出されるセシウムは原子炉建屋から地上放出されるものとして、次の被ばく経路ごとに、過渡相当、事故相当及びシビアアクシデント相当の各事象が発生した場合の敷地境界(周辺監視区域境界)での実効線量を評価した。

 ①放射性雲のセシウムからのガンマ線による外部被ばく
 ②放射性雲のセシウムの吸入摂取による内部被ばく
 ③地表沈着したセシウムからのガンマ線による外部被ばく
 ④地表沈着したセシウムから再浮遊したセシウムの吸入 摂取による内部被ばく



<u>環境影響評価に用いた計算式</u>

①放射性雲のセシウムからのガンマ線による外部被ばく

 $H_{\gamma} = K \cdot E_{\gamma} / 0.5 \cdot Q_{Cs} \cdot D / Q \cdot 1000$ 【「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」 (以下、「安全評価指針」という。】

 H_{γ} :放射性雲のセシウムからのガンマ線による外部被ばく実効線量(mSv)

 K :空気カーマから実効線量への換算係数(Sv/Gy)

 E_{γ} :ガンマ線の実効エネルギー(MeV)

 Q_{cs} :事故期間中のセシウムの大気放出量(Bq)

 D/Q :相対線量(Gy/Bq)

②放射性雲のセシウムの吸入摂取による内部被ばく

 $H_{Cs} = M \cdot K_{in} \cdot Q_{Cs} \cdot \chi / Q$ [[germatheral]]

 H_{Cs}
 :放射性雲のセシウムの吸入摂取による内部被ばく実効線量(mSv)

 Ki_n
 :内部被ばく実効線量係数(成人)(mSv/Bq)

 M
 :成人の呼吸率(m³/s)

 X/Q
 :相対濃度(s/m3)

 Q_{Cs}
 :事故期間中のセシウムの大気中放出量(Bq)



③地表沈着したセシウムからのガンマ線による外部被ばく

 $G_{ex} = K_{ex} \cdot Q_{Cs} \cdot \chi / Q \cdot V \cdot f \cdot T \cdot 1000$ 【「発電用軽水型原子炉施設の安全審査における一般公衆の線量
評価について」(以下、「一般公衆線量評価」という。】

- G_{ex} :地表沈着したセシウムからのガンマ線による外部被ばく実効線量(mSv)
- *K_{ex}*:地表沈着による実効線量係数(成人)((Sv/s)/(Bq/m²))
- Q_{Cs}:事故期間中のセシウムの大気中放出量(Bq)
- χ/Q :相対濃度(s/m³)
- V :沈着速度(m/s)
- f :残存割合(-)
- *T*:被ばく期間(1年間=3.2×10⁷(s))

④地表沈着したセシウムから再浮遊したセシウムの吸入摂取による 内部被ばく

 $G_{in} = M \cdot K_{in} \cdot F \cdot Q_{Cs} \cdot \chi / Q \cdot V \cdot f \cdot T \qquad [- 般公衆線量評価]$

- *G_{in}*:地表沈着したセシウムから再浮遊したセシウムの吸入による内部被ばく 実効線量(mSv)
- *K_{in}*:内部被ばく実効線量係数(成人)(mSv/Bq)
- M :成人の呼吸率(m³/s)
- *F*:再浮遊率(m⁻¹)
- *Q_{Cs}*:事故期間中のセシウムの大気中放出量(Bq)
- χ/Q :相対濃度(s/m³)
- *V*:沈着速度(m/s)
- f :残存割合(-)
- *T*:被ばく期間(1年間=3.2×10⁷(s))



2.1 基本解析の解析条件及び解析結果

- セシウムの大気中放出量については、JNESの基本解 析結果(表2.1参照)を用いた。
- 相対濃度及び相対線量については、JNESの計算結果 (表2.4参照)を用いた。
- その他の解析条件については、表2.6参照



表2.4 相対濃度及び相対線量の97%値のJNES計算結果

評価方位(風向)	距離	相対濃度97%値	相対線量97%値
南(北)	1.20km	1.1 × 10⁻⁵ s/m³	1.8×10⁻¹º Gy/Bq
南南西(北北東)	0.71km	<u>2.6 × 10⁻⁵ s/m³</u>	<u>3.2×10⁻¹⁹ Gy/Bq</u>
南西(北東)	0.69km	*	*
西南西(東北東)	0.73km	*	*
西(東)	1.14km	*	*
西北西(東南東)	1.19km	*	*
北西(南東)	1.13km	4.7 × 10⁻ ⁶ s/m³	1.0×10⁻¹º Gy/Bq
北北西(南南東)	2.11km	9.1 × 10⁻ ⁶ s/m³	1.3×10 ⁻¹⁹ Gy/Bq
北(南)	2.15km	1.6 × 10⁻⁵ s/m³	2.4 × 10⁻¹⁰ Gy/Bq

<u>赤字</u>:最大値

*風向が当該方位に出現する数が全体の3%よりも小さいため、相対濃度及び 相対線量の97%値が出現しない。



- シビアアクシデント相当事象については、3基合計でも年間1mSv を下回る。
- JNES基本解析と事業者解析が異なるのは、セシウムの大気中 放出量の相違による要因が大きい。

表2.5 実効線量の基本解析結果(シビアアクシデント相当)

事象	JNES基本解析1	JNES基本解析2	事業者解析
①放射性雲のセシウムか らのガンマ線による外部被 ばく	約3.8×10 ⁻⁷ mSv	約2.3×10⁻⁵mSv	約5.0×10⁻⁴mSv
②放射性雲のセシウムの 吸入摂取による内部被ばく	約1.4×10 ⁻⁴ mSv	約8.4×10 ⁻³ mSv	約1.4×10 ⁻¹ mSv
③地表沈着したセシウム からのガンマ線による外部 被ばく	約4.6×10⁻³mSv	約2.8×10 ⁻¹ mSv	約3.3mSv
④地表沈着したセシウム から再浮遊したセシウムの 吸入摂取による内部被ばく	約3.3×10⁻⁵mSv	約2.0×10 ⁻³ mSv	約2.3×10 ⁻¹ mSv
①~④合計	約4.8×10 ⁻³ mSv	約2.9×10 ⁻¹ mSv	約3.7mSv



2.2 参考解析の解析条件及び解析結果

- セシウムの大気中放出量については、東電報告書記載値を 用いた。

事象	核種	東電報告書記載値
シビアアクシデント	Cs-134	約4.0×10¹¹ Bq
相当	Cs-137	約3.5×10 ¹¹ Bq

- 相対濃度及び相対線量については、東電報告書記載値を 用いた。

	東電報告書記載値
相対濃度	2.6 × 10⁻⁵s/m³
相対線量	3.0×10 ⁻¹⁹ Gy/Bq

- その他の条件(表2.6)についても、事業者の設定値を使用。



)
--	---

パラメータ	JNES【出典】	事業者【出典】	妥当性確認欄
①放射性雲のセシウムから	のガンマ線による外部被ばく	〈実効線量	
空気カーマから実効線量 への換算係数(Sv/Gy)	1.0【「安全評価指針」】	1.0【同左】	記載ミス無し
ガンマ線の実効エネルギ ー(MeV)	Cs-134;1.56 Cs-137;0.60 【「一般公衆線量評価」】	Cs-134;1.58 Cs-137;0.56 【「発電用軽水型原子炉施 設における放出放射性物 質の測定に関する指針」 のガンマ線放出エネル ギーと放出比から算出】	計算ミス無し 両者の違いは、出典の 違いによるものである が、結果にあまり影響 はないと考えられる。
②放射性雲のセシウムの吸	及入摂取による内部被ば<実<	効線量	
内部被ばく実効線量係数 (成人)(mSv/Bq)	Cs-134;2.0×10 ⁻⁵ Cs-137;3.9×10 ⁻⁵ 【「環境放射線モニタリン グ指針」】	Cs-134;2.0×10 ⁻⁵ Cs-137;3.9×10 ⁻⁵ 【「緊急時環境モニタリン グ指針」(現在、「環境放 射線モニタリング指針」に 改訂)】	記載ミス無し
成人の呼吸率(m ³ /s)	1.2m ³ /h(活動時) 【「安全評価指針」(ICRP Publ.71)】	22.2m ³ /d(一日平均) 【「緊急時環境モニタリン グ指針」(現在、「環境放 射線モニタリング指針」に 改訂)(ICRP Publ.71)】	放出継続時間が1時間 なので、活動時の値が 妥当である。



表2.6 解析条件の妥当性確認(2/3)

パラメータ	JNES【出典】 事業者【出典】		妥当性確認欄	
③地表沈着したセシウムからのガンマ線による外部被ばく実効線量				
地表沈着による実効線量 係数(成人) ((Sv/s)/(Bq/m ²))	Cs-134;1.4×10 ⁻¹⁵ Cs-137;5.3×10 ⁻¹⁶ 【FGR12 (EPA-402-R- 93-081) (ICRP90年勧告 ベースで計算)】	Cs-134;1.5×10 ⁻¹⁵ Cs-137;5.8×10 ⁻¹⁶ 【FGR12 (EPA-402-R- 93-081) (ICRP77年勧 告)】	実効線量当量係数で はなく、ICRP90年勧告 ベースで計算した方が 望ましいが、結果にあ まり影響はないと考え られる。	
沈着速度(m/s)	0.01【「一般公衆線量評 価」】	0.01【同左】	記載ミス無し	
残存割合(一)	1.0【「一般公衆線量評価」 に0.5とあるが、保守的に 1.0と仮定(意見聴取会委 員コメント)】	0.5[FGR12(EPA-402-R- 93-081)]	FGR12に、0.5の値が 記載されているかどう か再確認が必要	



表2.6 解析条件の妥当性確認(3/3)

パラメータ	JNES【出典】	事業者【出典】	妥当性確認欄
④地表沈着したセシウムが	ら再浮遊したセシウムの吸入	入摂取による内部被ばく実効	線量
内部被ばく実効線量係数 (成人)(mSv/Bq)	Cs-134;2.0×10 ⁻⁵ Cs-137;3.9×10 ⁻⁵ 【「環境放射線モニタリン グ指針」】	Cs-134;2.0×10 ⁻⁵ Cs-137;3.9×10 ⁻⁵ 【「緊急時環境モニタリン グ指針」(現在、「環境放射 線モニタリング指針」に改 訂)】	記載ミス無し
成人の呼吸率(m ³ /s)	22.2m ³ /d(一日平均) 【「安全評価指針」(ICRP Publ.71)】	22.2m ³ /d(一日平均) 【「緊急時環境モニタリン グ指針」(現在、「環境放射 線モニタリング指針」に改 訂)(ICRP Publ.71)】	記載ミス無し
再浮遊率(m ⁻¹)	1.0×10 ⁻⁶ 【「一般公衆線量評価」】	1.0×10 ⁻⁵ 【NUREG/CR-6613 (Code Manual for MACCS2)のRWCOEF】	<u>事業者は再浮遊ウェザリ</u> ング方程式から、再浮遊 のウェザリングによる減 衰を無視して、初期値を 1年間一定として採用
沈着速度(m/s)	0.01【「一般公衆線量評 価」】	0.01【同左】	記載ミス無し
残存割合(一)	1.0【「一般公衆線量評価」 に0.5とあるが、保守的に 1.0と仮定(意見聴取会委 員コメント)】	0.5[FGR12(EPA-402-R- 93-081)]	FGR12に、0.5の値が 記載されているかどう か再確認が必要



- 参考解析の結果が事業者解析と一致することから、計算過程 に誤りがないことを確認した。

表2.7 実効線量の参考解析結果の比較表(シビアアクシデント相当)

被ばく経路	JNES参考解析	事業者解析
①放射性雲のセシウムからのガン マ線による外部被ばく	約5.0×10 ⁻⁴ mSv	約5.0×10 ⁻⁴ mSv
②放射性雲のセシウムの吸入摂 取による内部被ばく	約1.4×10 ⁻¹ mSv	約1.4×10 ⁻¹ mSv
③地表沈着したセシウムからのガ ンマ線による外部被ばく	約3.3mSv	約3.3mSv
④地表沈着したセシウムから再浮 遊したセシウムの吸入摂取による 内部被ばく	約2.3 × 10 ⁻¹ mSv	約2.3 × 10 ⁻¹ mSv
①~④合計	約3.7mSv	約3.7mSv



2.3 感度解析の解析条件及び解析結果

- シビアアクシデント相当事象を対象に次の感度解析を行い、 線量に及ぼす影響を確認した。

感度解析1;降雨の影響

感度解析2;吹き上げ高さ(浮力による上昇)の影響

感度解析3;実効放出継続時間の影響

2.3.1 感度解析1(降雨の影響)

- 湿性沈着を無視した場合と湿性沈着を考慮した場合の相対 沈着量を比較すると、出現確率97%値では大差ないことが 確認できた。



感度解析1に用いた計算式

時刻*i*における気象データから相対沈着量等を次式で計算する。 $S = V \cdot \gamma / O$

:沈着速度(m/s)

X/Q :相対濃度(s/m³)

$$V = V_d + V_r$$
 【「日本原
電所の確
 $V_r = \Lambda \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma_z(x)$ 2008」】

V

【「日本原子力学会標準 原子力発 電所の確率論的安全評価に関する 実施基準(レベル3PSA編): 2008」】

$$\Lambda = 1.2 \times 10^{-4} \cdot R^{0.5}$$

 V_d :乾性沈着速度(m/s)
 V_r :湿性沈着速度(m/s)
 Λ :ウォッシュアウト係数(1/s)
 $\sigma_z(x)$:距離xにおける垂直方向の拡散パラメータ(m)
 R :降雨強度(mm/h)

$$C_{g} = S \cdot Q_{Cs}$$

 C_{g} : セシウムの地表面濃度(Bq/m²)
 Q_{Cs} : セシウムの大気中放出量(Bq)

$$G_{ex} = K_{ex} \cdot C_g \cdot f \cdot T \cdot 1000$$

 G_{ex} : グランドシャイン実効線量(mSv)
 K_{ex} : 地表沈着による実効線量係数(成人)((Sv/s)/(Bq/m²))
 f : 残存割合(-)
 T : 被ばく期間(1年間=3.2×10⁷(s))



表2.8 相対沈着量、地表面濃度及び実効線量の結果(感度解析1)				
	97%値 (上段:降雨無しの場合(湿性沈着を無視)/下段:降雨を含めた場合(湿性沈着を考慮))			
評価万位(風 向)	相対沈着量 (1/m²)	Cs-134地表面 濃度*(Bq/m²)	グランドシャイン 実効線量(mSv)	
南(北)	約1.1×10 ⁻⁷	約1.9×10 ³	約1.2×10 ⁻¹	
	約1.1×10 ⁻⁷	約1.9×10 ³	約1.2×10 ⁻¹	
南南西(北北東)	<u>約2.6×10⁻⁷</u>	<u>約4.6×10³</u>	<u>約2.8×10-1</u>	
	<u>約2.6×10⁻⁷</u>	<u>約4.6×10³</u>	<u>約2.8×10-1</u>	
北西(南東)	約4.7×10 ⁻⁸	約8.3×10 ²	約5.0×10 ⁻²	
	約4.7×10 ⁻⁸	約8.3×10 ²	約5.0×10 ⁻²	
北北西(南南東)	約9.1×10 ⁻⁸	約1.6×10 ³	約9.7×10 ⁻²	
	約9.3×10 ⁻⁸	約1.6×10 ³	約1.0×10 ⁻¹	
北(南)	約1.6×10 ⁻⁷	約2.9×10 ³	約1.7×10 ⁻¹	
	約1.9×10 ⁻⁷	約3.4×10 ³	約2.1×10 ⁻¹	

*地表面濃度(基本解析2の放出量を使用)の結果が大きいCs-134のみ代表で記載した。 <u>下線付</u>:最大値

赤字;降雨を含めた場合、降雨無しの場合に比べて結果が大きい。



2.3.2 感度解析2(浮力による上昇の影響)

- 浮力による上昇を考慮した場合、放出高さが高くなったことにより、相 対濃度の最大値出現距離が敷地境界よりも遠くなった評価方位もある が、相対濃度の値は、地上放出に比べて低いことが確認できた。

感度解析2に用いた計算式

【「発電用原子炉施設の安全解析に関する気象指針」 (以下、「気象指針」という)】

 $\Delta h = \frac{1.6 \cdot F^{1/3} \cdot x^{2/3}}{u}$

 $(\chi/Q) = \frac{1}{\pi \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z \cdot u} \cdot \exp\left(-\frac{Q}{2\sigma_z^2}\right)$

[G.A. Briggs,"Lift-off of Buoyant Gas Initially on the Ground," ADTL Contribution File No.87, Air Resources Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory, NOAA, Oak ridge, Tennessee (1973)]

- ∠h :浮力による放射性雲の上昇距離(m)
- x :風下距離(m)
- u :風速(m/s)
- F :発生源からの上昇流束(m⁴/s³) ≒8.8×10⁻⁶×Q
- Q :エネルギー放出率(J/s)

(温度の基本解析2結果から、約1.1×10⁶(J/s))

- 浮力による上昇は、次の条件のいずれかにより停止する。
 - 1) Briggs提案の
 Ahが300F/u³に達したとき
 - 2) 混合層高さに達したとき

【「レベル3PSA標準」】



表2.9 相対濃度97%値の結果(感度解析2)

評価方位 (風向)	南 (北)	南南西 (北北東)	北西 (南東)	北北西 (南南東)	北 (南)
基本解析(地_	L 放出)				
距離	1.2km	0.71km	1.13km	2.11km	2.15km
97%値の	3.6m/s	1.6m/s	3.1m/s	4.8m/s	2.6m/s
風速					
97%値の	С	В	В	D	D
大気安定度					
相対濃度 (s/m³)	1.1 × 10⁻⁵	<u>2.6 × 10⁻⁵</u>	4.7 × 10 ⁻⁶	9.1 × 10 ⁻⁶	1.6 × 10⁻⁵
浮力による上昇を考慮した場合					
放出高さ	約63m	約170m	約98m	約26m	約166m
相対濃度最 大値(s/m³)	7.0×10 ⁻⁶	<u>4.6 × 10⁻⁶</u>	3.7 × 10 ⁻⁶	8.1 × 10 ⁻⁶	1.0×10 ⁻⁶
最大値出現 距離	約1.2km	約1.06km	約1.13km	約2.11km	約5.8km



2.3.3 感度解析3(実効放出継続時間の影響)

- JNES基本解析1の放出率から、次式で実効放出継続時間を計算すると1hとなるため、結果に影響はない。
- JNES基本解析2の放出率から、次式で実効放出継続時間を計算す ると4hとなる。この場合、実効放出継続時間1hの場合に比べて、相 対濃度97%値は約1.6倍、相対線量97%値は約1.0倍となった。

実効放出継続時間(h)=

事故期間中のセシウムの全放出量(Bq)

1時間当たりの最大放出量(Bq/h)

【「気象指針」】

	相対濃度97%値	相対線量97%値
実効放出継続時間1h	2.6 × 10⁻⁵ s/m³	3.2 × 10⁻¹⁰ Gy/Bq
実効放出継続時間4h	4.1 × 10⁻⁵ s/m³	3.3 × 10⁻¹⁰ Gy/Bq

	実効線量(被ばく経路合計)
実効放出継続時間1hの場合	約2.9×10 ⁻¹ mSv
実効放出継続時間4hの場合	約4.6×10 ⁻¹ mSv

* 実効線量合計値には、被ばく経路③(地表沈着したセシウムからのガンマ線による外部被ばく)の寄与 が大きいので、相対濃度の違いがほぼ反映される。



表2.10 相対濃度及び相対線量の97%値の結果(感度解析3) (シビアアクシデント相当事象;実効放出継続時間4h)

評価方位(風向)	距離	相対濃度97%値	相対線量97%値
南(北)	1.20km	2.5 × 10⁻⁵ s/m³	2.7×10 ⁻¹⁹ Gy/Bq
南南西(北北東)	0.71km	<u>4.1 × 10⁻⁵ s/m³</u>	<u>3.3×10⁻¹⁹ Gy/Bq</u>
南西(北東)	0.69km	1.1 × 10⁻⁵ s/m³	1.5×10 ⁻¹⁹ Gy/Bq
西南西(東北東)	0.73km	9.8 × 10⁻ ⁶ s/m³	1.3×10 ⁻¹⁹ Gy/Bq
西(東)	1.14km	3.3 × 10⁻ ⁶ s/m³	6.4×10 ⁻²⁰ Gy/Bq
西北西(東南東)	1.19km	2.5 × 10⁻ ⁶ s/m³	4.8×10⁻²⁰ Gy/Bq
北西(南東)	1.13km	5.9×10⁻ ⁶ s/m³	9.7×10 ⁻²⁰ Gy/Bq
北北西(南南東)	2.11km	1.0 × 10⁻⁵ s/m³	1.5×10 ⁻¹⁹ Gy/Bq
北(南)	2.15km	2.6 × 10⁻⁵ s/m³	2.7×10 ⁻¹⁹ Gy/Bq



要因分析

- 福島第一では、相対濃度97%値の最大値が出現する風向 (北北東)では、実効放出継続時間1hの場合、相対濃度97% 値としてB型が出現している。
- 実効放出継続時間が長くなると、継続時間中に相対濃度が大きくなるD,E,F型の出現頻度が多くなるため、相対濃度97%値が大きくなる。
- なお、他の幾つかのサイトの気象データを用いて確認したところ、地上放出の場合、実効放出継続時間が短い方が相対濃度97%値及び相対線量97%値は保守的となった(大半が大気安定度Fの際に97%値が出現)。



3.まとめ

シビアアクシデント相当事象に対する基本解析、参考解析及び感度解析の結果、次のことを確認した。

- 基本解析では、セシウムの放出量及び環境影響評価を行い、 最終的な線量の計算結果が3基合計でも年間1mSvを下回る ことを確認した。
- 参考解析では、事業者と同等な解析モデル及び解析条件を 用いてセシウムの放出量及び環境影響評価を行い、評価結 果を比較することによって、保守性の大きな事業者評価の計 算過程に誤りがないことを確認した。
- 線量の感度解析では、降雨を考慮した場合や浮力による上 昇を考慮した場合でも結果にあまり影響がないことを確認した。