

# 原子力施設の環境影響評価と 原子力安全規制での利用

---

高原省五 (JAEA)

以下の方々のご協力のもと作成しました。

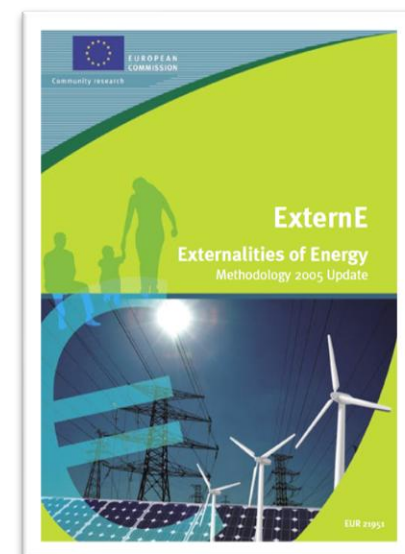
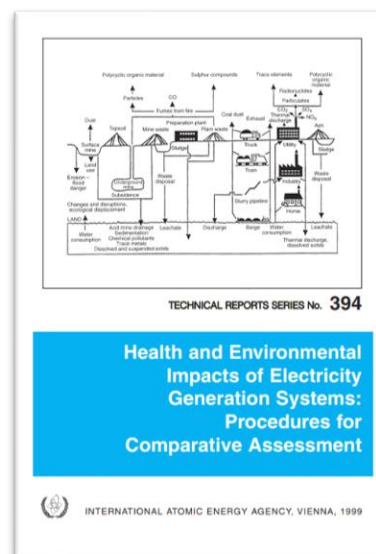
更田豊志(東京大学)、成川隆文(東京大学)、荻野徹(京都大学)、  
平野雅司(元JAEA)、本間俊充(元JAEA)、村松健(JAEA)、鄭嘯宇(JAEA)

## ■ 影響評価の方法

## ■ 原子力安全規制における影響評価の利用

- 米国NRCにおける費用便益分析の実施
- 米国の原子力安全規制における費用便益分析の利用  
(バックフィットの例)
- 他の環境リスク規制との比較

- 発電技術は、社会活動の基盤となる電力を供給する一方で、人の健康や環境に有害な影響を及ぼしている。
  - 影響評価の際には、**発電所だけでなく、燃料の採掘から廃棄まで、全ての段階から放出される可能性を考慮**し、全体のどの部分を評価対象にしているかを明確にして実施する必要がある。
  - **平常運転時だけでなく、施設の建設と閉鎖段階、並びに事故等によっても放出され潜在的な影響の原因となる。**
- 国際的なプロジェクトで影響評価の方法の開発が行われ、工学的な評価レベル3PRA、ExternEで用いられた影響経路法。
  - IAEAによる国際共同研究プログラム
    - 1994年～1998年までに加盟国12か国の研究機関が参加して実施。評価方法に関するコンセンサスを醸成。
  - 欧州委員会(EC)によるExtern E (External Costs of Energy)プロジェクト
    - ECが米国エネルギー省と協力して1991年～1999年に実施。
    - 1999年以降、各種の発電技術及び方法論に関する報告書を出版。



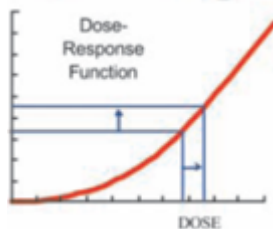
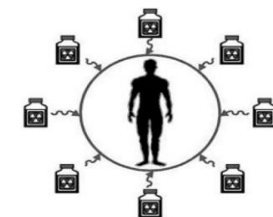
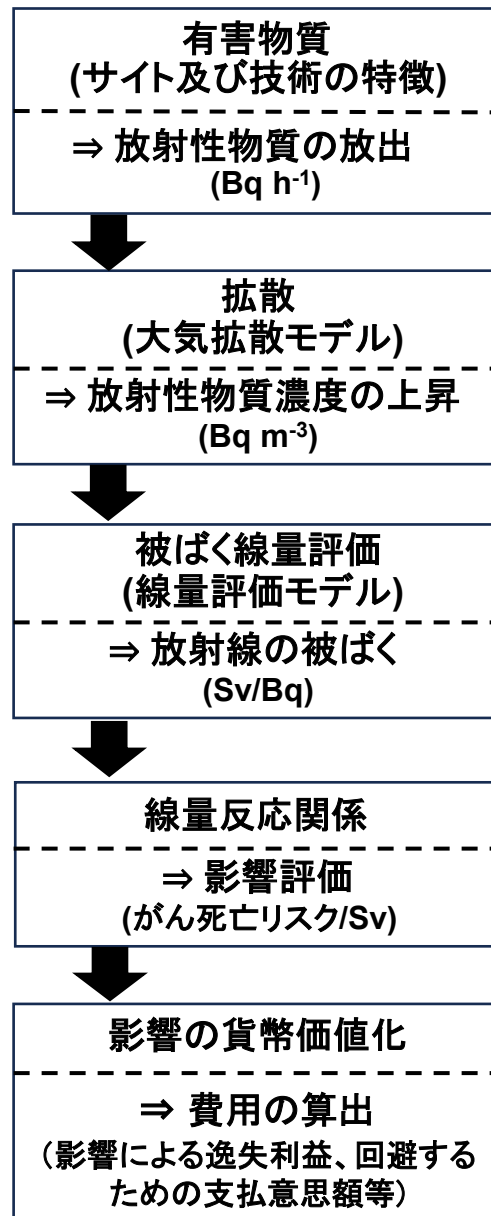
## ■ 放出源の情報

- 平常時の評価については、既存施設のデータを利用することができる。
- 事故時の評価については、放出量に関する施設内の事象進展等の解析が必要となる(例: 原子力発電所の場合、レベル2PRA)

## ■ 影響経路法

- 有害物質の放出から影響の発生に至る因果系列に基づいて、物質濃度や影響を積み上げていく方法(原子力発電所に対するレベル3PRAもこれと同様の方法を採用)
- 目的に応じて、被ばく線量、被ばくによる健康リスク、貨幣評価値等が評価結果として用いられる。
- 特に、死亡リスクの貨幣価値化においては、統計的生命価値(Value of Statistical Life: VSL)が用いられる。

下段の単は、放射性物質の場合



## ■ 影響評価の方法

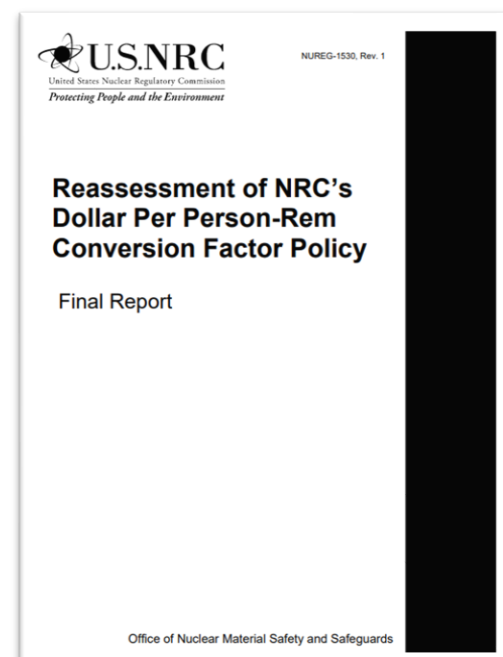
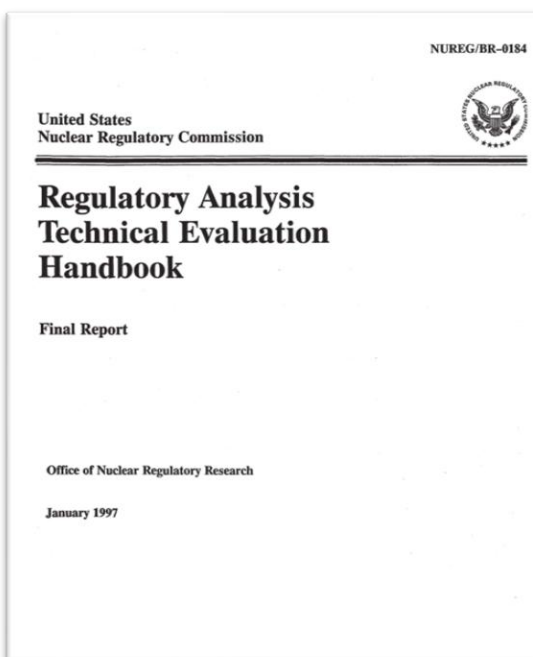
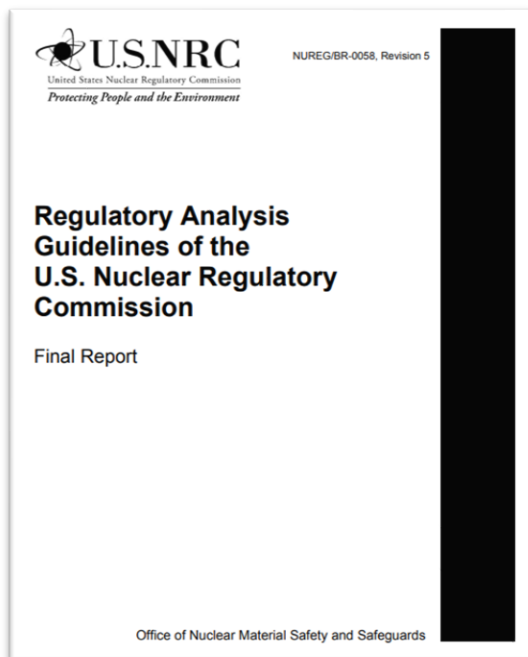
## ■ 原子力安全規制における影響評価の利用

- 米国NRCにおける費用便益分析の実施
- 米国の原子力安全規制における費用便益分析の利用  
(バックフィットの例)
- 他の環境リスク規制との比較

- 環境影響評価による評価結果を原子力安全規制で利用する例として、米国では、費用便益分析を実施し、規制の妥当性や必要性を判断する際に利用されることがある。
  - 規制影響分析  
クリントン大統領の大統領令12866に従って、規制影響分析を実施し、「便益は費用を正当化すべき」ことが要求される。NRCは独立行政機関であるため、大統領令に従って厳格な規制制定プロセスを経る必要はないが、NUREG/BR-0058等のガイドラインは、大統領令に基づく規制影響分析と矛盾しないように配慮されている。
  - バックフィット・ルール(10 CFR 50.109)  
既施設に新要件を課す場合、「実質的な安全向上」かつ「費用に見合う」ことが必須(規制分析書がバックフィット分析を兼ねることが明確にされている)。

## ■ NRCによる関連文書

- NUREG/BR-0058 Rev.5, Regulatory Analysis Guidelines (2017)  
規制分析 (Regulatory Analysis) の基本的な考え方・手順を定める文書。費用便益分析を含む分析全般に関する判断基準、方針、構造、定義等を整理。
- NUREG/BR-0184, Technical Evaluation Handbook (1997)  
実務者向けの「技術的ハンドブック」であり、定量的な費用便益分析の実行方法を提供。具体的な計算式やパラメータの設定方法、CBAの評価例などを掲載。
- NUREG-1530 Rev.1, Reassessment of NRC's Dollar Per Person-Rem Conversion Factor Policy (2022)



## ■ 評価すべき属性(NUREG/BR-0058 Rev.5の5.2をもとに記載)

属性(次ページの記号(単位))		概要
公衆の健康(事故時、平常時)	$Y_p$ (円)	<ul style="list-style-type: none"> <li>施設から半径50マイル内の公衆の被ばく線量を評価。被ばく線量の変化に貨幣換算係数(人レム当たりドル)を乗じて貨幣価値を算出する。</li> </ul>
作業者の健康(事故時、平常時)	$Y_w$ (円)	<ul style="list-style-type: none"> <li>オンサイトの作業者の被ばく線量を評価。急性及びがんの双方を考慮する。公衆と同様、貨幣換算係数(人レム当たりドル)を乗じて貨幣価値を算出する。</li> </ul>
オフサイトの財産	$X_{off}$ (円)	<ul style="list-style-type: none"> <li>直接的(例:土地、食料、水)及び間接的(例:観光)な影響を考慮する。除染、避難などの防護対策の費用も含まれる。</li> </ul>
オンサイトの財産	$X_{on}$ (円)	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉の代替電源、除染、および改修費用などが含まれる。</li> </ul>
規制の導入時における事業者及びNRCの負担	$Z_i$ (円)	<ul style="list-style-type: none"> <li>提案された措置を実施するための事業者及びNRCの経済的影響であり、管理活動、設備、労働力、材料、停止費用などが含まれる。</li> </ul>
規制導入後の運転時における事業者及びNRCの負担	$Z_o$ (円)	<ul style="list-style-type: none"> <li>提案された措置で必要とされる日常のかつ反復的な活動による経済的影響。施設の耐用年数にわたって発生するものとして評価。</li> </ul>
他の政府機関への波及	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>提案された措置の実施または運用に起因する連邦政府と州・地方政府への経済的影響。</li> </ul>
公衆への波及	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>提案された措置の実施または運用の結果として、公衆が支払う負担費用。例えば、汚染物質の清掃費用、活動による資産価値の損失など。</li> </ul>
知識の改善	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>提案された措置の実施の結果から得られる安全性の向上や不確実性の低減を促進するような情報が含まれる。この属性は、基本的には定性的なもの。</li> </ul>
規制の効率	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>提案された措置から生じる規制等の改善。国際基準との整合性の達成等も含まれる。</li> </ul>
セーフガードとセキュリティに関する考慮	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>提案された措置が保障措置及びセキュリティに及ぼす影響を、可能な場合には定量的に、難しい場合には定性的に評価する。</li> </ul>
環境に関する考慮	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>規制影響分析は、規則そのものを変更する際に行われ、一方で個別の許認可に係るものは国家環境政策法(NEPA)で対応。NEPAで求める環境影響評価書(EIS)や環境アセスメント(EA)による代替案当と整合を図ること。</li> </ul>
その他の考慮	—	<ul style="list-style-type: none"> <li>上記以外の状況に応じて固有の属性(例:放射線以外の健康影響など)を考慮する。</li> </ul>



# 費用と便益の定量的な評価

- 公衆及び作業者の健康、オフサイトとオンサイトの財、並びに、事業者及びNRCの初期導入及び継続運用のための費用が定量的評価の中心。
- 正味便益  $B$  (円) は、便益と費用の差として、以下の式で表される。

$$B = (\Delta Y_p + \Delta Y_w + \Delta X_{off} + \Delta X_{on}) - (Z_i + Z_o)$$

規制の導入で回避された健康への影響 ( $\Delta Y_p$  と  $\Delta Y_w$ ) と財への影響 ( $\Delta X_{off}$  と  $\Delta X_{on}$ ) を便益とみる

規制の初期導入費用 ( $Z_i$ ) と継続費用 ( $Z_o$ )

$$= (VSL \cdot (\Delta R_p + \Delta R_w) + \Delta X_{off} + \Delta X_{on}) - (Z_i + Z_o)$$

健康への影響は、リスクの低減 ( $\Delta R_p$  と  $\Delta R_w$ ) と統計的生命の価値 (VSLで貨幣価値化できる)

- 費用と便益の比較に基づく狭義の正当化と最適化

➤ 正当化  $\Leftrightarrow$  正味便益  $B$  が正

$$\Leftrightarrow VSL \geq \frac{(Z_i + Z_o) - (\Delta X_{off} + \Delta X_{on})}{\Delta R}$$

↑  
単位リスク削減便益

↑  
単位リスク削減費用

➤ 最適化  $\Leftrightarrow$  最も効率の良い選択肢を選ぶこと

$\Leftrightarrow$  単位リスク削減費用の最小化

- 影響評価の方法
- 原子力安全規制における影響評価の利用
  - 米国NRCにおける費用便益分析の実施
  - 米国の原子力安全規制における費用便益分析の利用  
(バックフィットの例)
  - 他の環境リスク規制との比較

## ■ 10CFR50.109 Backfittingの要約

- (a)(1) (バックフィットの定義についての記載)「施設の系統・構造・部品、設計、手順、組織等に関する変更または追加であって、委員会規則の規定の改定や規則の解釈の変更等により、建設や運転の許認可よりも後に許認可保有者に対して課されるもの」
- (a)(2) (a)(4)の場合を除き、委員会は、課そうとしているバックフィットについて、(c)項に従って**体系的かつ文書化された解析を必要とする**。
- (a)(3) その解析に基づき、公衆の健康・安全又は共通の防衛と安全保障(common defense and security)の防護(protection)が実質的に向上し、**直接又は間接的費用が向上した防護の観点から正当化される場合に限り、バックフィットする**。
- (a)(4) (a)(2)及び(a)(3)が適用されず、バックフィット解析が必要ではない場合
  - (i) 委員会のライセンス、規則若しくは命令に施設を適合させるため、修正/改造(modification)が必要であるか、又は、ライセンス保持者による書面による誓約に適合させるため、修正/改造が必要である場合。
  - (ii) 施設が公衆の健康と安全に対して**適切な防護(adequate protection)を提供することを確実にし**、かつ、共通の防衛と安全保障に適合するために、その規制措置が必要な場合。
  - (iii) 公衆の健康と安全又は共通の防衛と安全保障について、その規制措置が、**どの防護レベルが適切であるとみなすべきかについての定義又は再定義を含む場合**。

## ■ 定量化できない要因の考慮

- SRM-SECY-14-0087「規制分析およびバックフィット分析の開発における要因の定性的考察」において、規制分析及びバックフィット分析の明確性、透明性及び一貫性を向上させるため、**定性的要因の使用に関するガイダンスの更新を承認。ガイダンスの作成に当たって、以下の原則を提示：**
  - ・ 不確実性の取り扱いを含む定量分析手法の改善を継続的に追求すべきである。
  - ・ 提案された要件の実施コストについて現実的な見積もりを作成するために、入手可能な最良の情報を使用すべきである。
  - ・ 定性的な要因が慎重かつ規律ある方法で使用されることを確保するため、改訂されたガイダンスは、**可能な限りコストの定量化を継続的に奨励し、定量的な分析が不可能または非現実的である場合（すなわち、方法論やデータの不足による場合）に限り、意思決定の参考として定性的な要素を使用すべき**である。
  - ・ 透明性と意思決定の改善のため、改訂ガイダンスでは、定性的要因の選定根拠を職員がどのように説明するか、また感度分析を含む分析におけるこれらの要因の使用方法を具体的に記述すべきである。
- 上記を受け、において、「規制分析の重要な要素となりうるので、定性的要因は、分析者と意思決定者が、適切に考慮すべきである」とし、**NUREG/BR-0058 Rev.5 Appendix Aに定性的な分析の具体的な方法が提供されている。**

## 米国NRCにおける費用便益分析の例 (1F事故の知見とSA条件下で運転可能な格納容器強化ベント)

- 「シビアアクシデント(SA)条件下で運転可能な信頼性の高い格納容器強化ベント (HCV: Hardened Containment Vent)に関するライセンス変更」の発令
- 経緯
  - 1F事故後、米国では「The Near-Term Task Force Review of Insights from The Fukushima Dai-ichi Accident」(USNRC, 2011)が2011年7月12日に公開され、12の勧告を提示。
  - その後、NRCは長期的評価に移行。勧告の優先順位付け(Tear 1 to Tear 3)を実施(SECY-11-0137)。これに基づいて3つの命令を発令。
    - EA-12-049: 設計基準を超える外的事象に関する緩和(2012年3月)
    - EA-12-051: 使用済燃料プールの信頼性の高い計装(2012年3月)
    - **EA-12-050: 信頼性の高いHCV(Mark I及II) (2012年3月)**
      - ✓ 2013年6月に、上記からの変更指令としてEA-13-109を発出し、SA時に運転可能な信頼性の高いHCV(Mark I及II) (2013年6月)の発令
- EA-12-050では、**信頼性の高いHCVの設置は、崩壊除去機能喪失時の炉心損傷を防止するため、公衆の健康と安全の「適切な防護」に不可欠であると結論** (10CFR50.109の除外規定(a)(4)の(ii)が適用され**費用便益分析は不要**)。
- ただし、**「SA条件下でも機能すべき」という課題**があり、これは適切な防護への追加となるので、10CFR50.109(a)(3)に基づいて費用便益分析が行われ(SECY-12-0157)、その結果、SA条件下でのHCVが追加要件となった(EA-13-109)。

## 米国NRCにおける費用便益分析の例 (SECY-12-0157における費用便益分析(1/3))

### ■ SECY-12-0157「Mark I及びMark IIの沸騰水型原子炉に関する格納容器ベントシステムの追加要件の検討」

#### ➤ 検討した選択肢

- |          |                 |                                   |
|----------|-----------------|-----------------------------------|
| • オプション1 | 耐圧強化ベント         | 現状維持、追加措置無し。                      |
| • オプション2 | シビアアクシデント対応のHCV | シビアアクシデント時でも機能するように設計されたHCVに更新する。 |
| • オプション3 | フィルターベント        | フィルター付きのベントシステムを設計・設置。            |



- オプション1をベースラインとして、オプション2及びオプション3を導入した際の費用便益分析を実施。

# 米国NRCにおける費用便益分析の例 (SECY-12-0157における費用便益分析(2/3))

- 各オプションについてMELCOR及びMACCS2を用いて炉内解析及び事故影響評価を実施(詳細については、SECY-12-0157参照)。
- オプション1をベースラインとして、それとの差分として各オプションの費用または便益を評価。

属性		費用(赤字)と便益(黒字)(10 <sup>3</sup> \$)(1基あたり) <sup>(1)</sup>			
		オプション2 SA対応のHCV		オプション3 フィルタベント	
		2 × 10 <sup>-5</sup> 炉・年	2 × 10 <sup>-4</sup> 炉・年	2 × 10 <sup>-5</sup> 炉・年	2 × 10 <sup>-4</sup> 炉・年
健康	公衆	300 <sup>(3)</sup>	3,000	580 <sup>(3)</sup>	5,800
	職業人	22 <sup>(3)</sup>	220	38 <sup>(3)</sup>	380
財産	オフサイト	348	3,480	600	6,000
	オンサイト	268	2,680	430	4,300
事業者	導入時	2000		15,000	
	運転時	—		1,100	
NRC	導入時	27		27	
	運転時	—		—	
合計		1,089	7,353	14,479	353

(1) 費用と便益の評価の際には炉寿命25年を仮定。

(2) 被ばく線量を貨幣価値に換算する際には割引率3%とし、単位集団線量の貨幣評価値を4,000 \$/人remとして評価。

(3) 回避線量は次の通り。オプション2: 公衆= 4.3 人・rem/炉・年、職業人 = 0.32人・rem/炉・年。オプション3 : 公衆= 8.2 人・rem/炉・年、職業人 = 0.55 人・rem/炉・年。



## 米国NRCにおける費用便益分析の例 (SECY-12-0157における費用便益分析(3/3))

- 費用便益分析の結果、**オプション2及び3ともに、発生頻度を $2 \times 10^{-5}$ とした場合には費用が便益を上回る可能性がある**。一方で、SECY-12-0157におけるNRCスタッフの結論は以下。
  - **事象の頻度や解析の仮定を見直すことで、便益の方が費用よりも大きくなる可能性がある**。(オプション2及び3ともに)
  - 特にオプション3について、以下のような**定性的な長所**がある。
    - ・ シビアアクシデント管理の支援(水素制御と圧力制御の改善、原子炉建屋への放射線の放出を最小化)
    - ・ 緊急時作業員の被ばく線量を低減
    - ・ 深層防護におけるSAの発生防止と影響緩和のバランスを改善
    - ・ 格納容器の信頼性に関する国際的なアプローチとの整合性を高める
  - 上記を受けて、SECY-12-0157における**NRCスタッフの結論は、オプション2及び3ともに費用のを正当化できると判断**。
- 上記を踏まえ、**最終的に、SRM-SECY-12-0157でオプション2を承認**。EA-12-050の改訂案を発行すべきことになった(EA-13-109)。(オプション3については、その後も検討が継続されることになり、**オプション3と4は含めずにオプション2のみ(すなわち、EA-13-109のまま)で実施することを決定(SRM-SECY-15-0085)**)



- 影響評価の方法
- 原子力安全規制における影響評価の利用
  - 米国NRCにおける費用便益分析の実施
  - 米国の原子力安全規制における費用便益分析の利用  
(バックフィットの例)
  - 他の環境リスク規制との比較

# 費用と便益の定量的な評価

- SECY-12-0157の結果は、原子力安全に係る他のリスク削減策や他の環境リスク削減策と比べて妥当な判断と言えるのか？
- 狭義の正当化と最適化の観点で分析 ppt. 9を再掲

➤ 正当化 ⇔ 正味便益Bが正

$$\Leftrightarrow VSL \geq \frac{(Z_i + Z_o) - (\Delta X_{off} + \Delta X_{on})}{\Delta R}$$

単位リスク削減便益

単位リスク削減費用

➤ 最適化 ⇔ 最も効率の良い選択肢を選ぶこと

⇔ 単位リスク削減費用の最小化

日本国内における統計的生命の価値(VSL)を評価

原子力安全に係る他のリスク削減策と、他の環境リスクに関する単位リスク削減費用を評価及び調査して整理

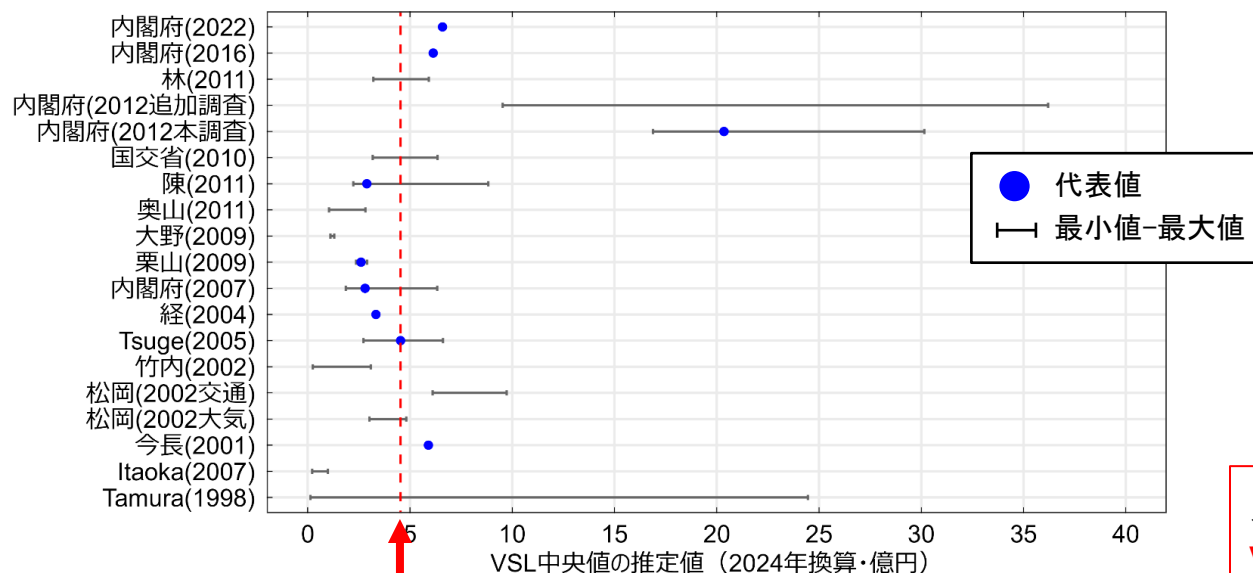
# 統計的生命の価値(VSL)のメタ分析

## ■ 統計的生命の価値(Value of Statistical Life: VSL)

- VSLは、死亡リスクを1単位減らすことの便益のことであり、死亡リスクの削減に対する支払意思額(Willingness To Pay: WTP)を、死亡リスクの削減分で割ったものとして得られる。
- 支払意思額(WTP)は、「ものに対してすすんで支払ってもよいと思う最大金額(岡,1999)」のことであり、社会調査で直接質問して調べる方法(仮想市場法)や、人々の経済行動から間接的に評価する方法が知られている。

## ■ メタ分析

- 2025年6月にCiNiiで文献検索。日本のVSLを対象とし、仮想市場法による独自推定を行った研究18件をレビュー(特に、藤見他(2023)を参考にした)。



メタ分析結果:  
**VSL中央値 = 4.54億円**

事例	措置	Cs-137 放出量	実施方法	費用便益の評価	単位死亡リスク削減費用
レベル 3PRAの 評価	HCVとフィルタベント (SECY-12-0157)	不明		<ul style="list-style-type: none"> <li>回避線量と貨幣価値換算係数 (\$/man-rem) で便益を評価</li> <li>費用の評価はSECY-12-0157による</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>HCVS 4.96~49.6億円</li> <li>フィルタベント 20.7~207億円</li> </ul>
	屋内退避 (廣内 他, 2025)	後期大規模 (5630 TBq) 管理放出 (151 TBq)	<ul style="list-style-type: none"> <li>PAZで予防的避難</li> <li>UPZで屋内退避(3日間)</li> <li>OIL2を超えた場合一時移転</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>回避線量とVSLを用いて便益を評価</li> <li>生産活動が滞ることをによるGNPの損失を評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>9.1~181億円(管理放出が下限、大規模放出が上限)</li> </ul>
	一時移転 (Takahara and Homma, 2009; 高原・本間, 2009)	後期大規模 (5630 TBq)	<ul style="list-style-type: none"> <li>導入レベルを超えた場合に移転を開始し、解除レベル未満になったときに帰還</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>回避線量とVSLを用いて便益を評価(平均値)</li> <li>年当たり一人当たりの避難費用(60万円/年(ICRP Pub. 63))を用いて評価</li> <li>残存線量も費用として計上</li> <li>100mSv/y未満のみ対象</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>4.2~193億円(解除のレベルに依存)</li> </ul>
1F事故 に基づく 評価	食品出荷制限 (Takahara et al., 2019)	1F2号機 (14800 TBq)	<ul style="list-style-type: none"> <li>放射性セシウム暫定規制値(500Bq/kg)(~2012年3月)と現行基準値(一般食品100Bq/kg)</li> <li>事故後1年目</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>回避線量とVSLを用いて便益を評価(平均値)</li> <li>食物中濃度に基づく線量評価モデルを開発</li> <li>費用算定は文献値を引用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>148億円</li> </ul>
	野菜出荷制限 (岡, 2012)		<ul style="list-style-type: none"> <li>放射性セシウム暫定規制値(500Bq/kg)</li> <li>事故後の4月末まで</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>食物中濃度に基づいて余命1年延長費用を評価</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>11億円(平均余命42年で換算)</li> </ul>
	コメ出荷制限 (岡, 2012)		<ul style="list-style-type: none"> <li>放射性セシウム暫定規制値(100 or 500Bq/kg)</li> <li>事故後1年目</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>食物中濃度に基づいて余命1年延長費用を評価</li> <li>基準値として100と500を用いて平均と最大を算出。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>322億~536億円(平均余命42年で換算)</li> </ul>

## 他の環境リスクでの単位リスク削減費用の評価

- 米国における死亡リスク削減の施策(Tengs他(1995))、及び、日本の化学物質関連の施策(岡, 2012)について文献調査。いずれも人命を1年救うために必要な費用を報告しており平均余命42年で換算。2024年時点の貨幣価値に補正して利用。

### ➤ 米国における死亡リスク削減の施策(Tengs他(1995))

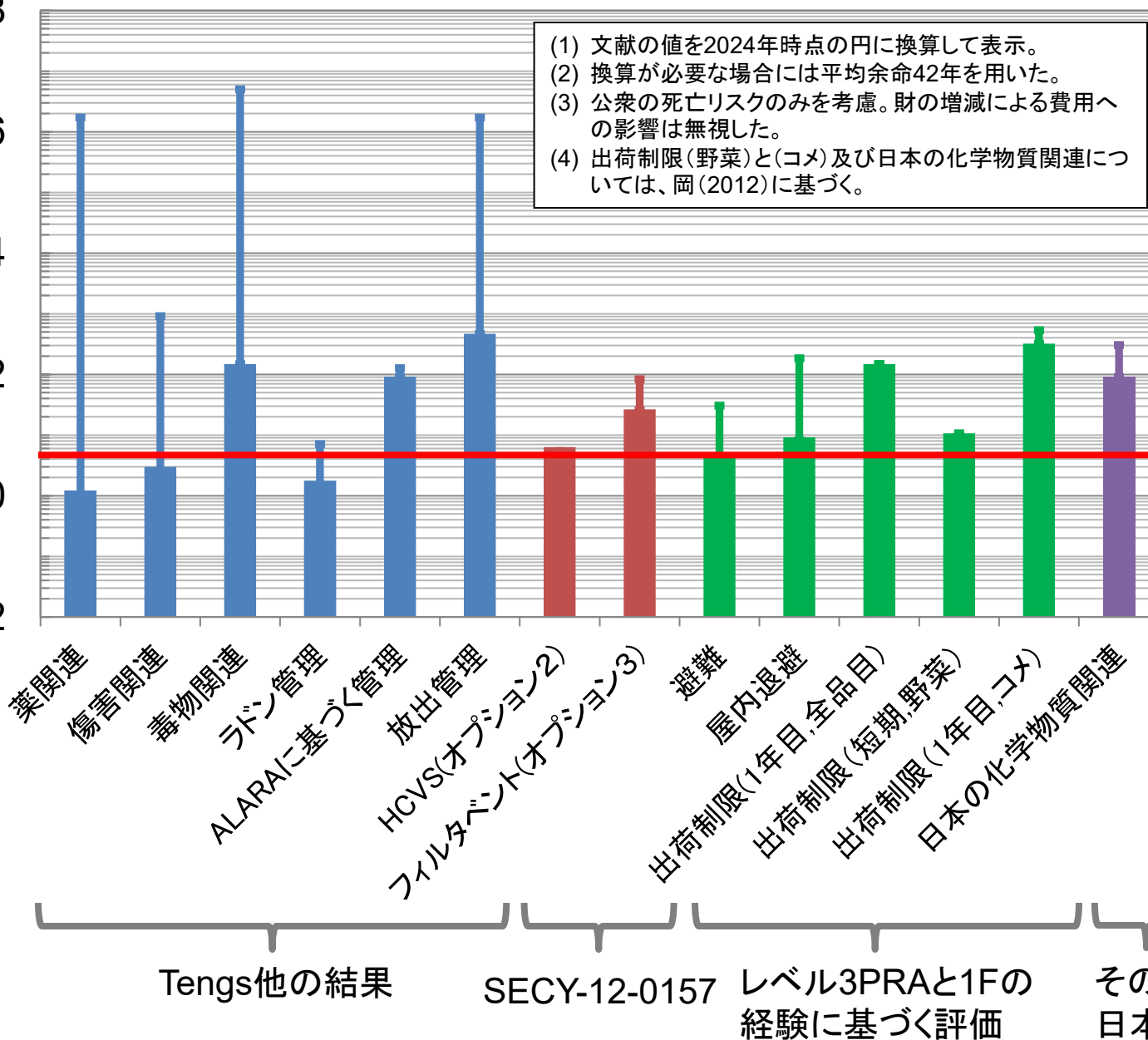
分野		件数	単位死亡リスク削減費用(億円)		
			最小値	中央値	最大値
薬関連		265	0.001	1.2	$1.7 \times 10^6$
傷害関連		119	0.004	3.0	$9.2 \times 10^2$
化学物質・毒物関連		87	0.004	148	$5.0 \times 10^6$
放射線関連	ラドン管理	3	0.31	1.8	7.1
	ALARAに基づく管理	2	56	91	$1.3 \times 10^2$
	放出管理	19	2.5	467	$1.7 \times 10^6$
合計		497	0.002	2.6	$5.0 \times 10^6$

### ➤ 日本の化学物質関連の施策(岡(2012)のレビュー結果を引用)

分野	単位死亡リスク削減費用(億円)	引用元
クロルデンの禁止	24.1	Oka et al., 1997
苛性ソーダ製造における水銀規制	306	Nakanishi et al., 1998
乾電池からの水銀除去	11.8	中西, 1995
ガソリン中のベンゼン規制	123	Kajihara et al., 1999
ダイオキシン管理(緊急の措置)	4.24	Kishimoto et al., 2001
ダイオキシン管理(長期的な措置)	80.4	Kishimoto et al., 2001
合計	最小値:4.24 平均値:91.6 最大値:306	

単位死亡リスク削減費用(億円)

1.E+08  
1.E+06  
1.E+04  
1.E+02  
1.E+00  
1.E-02



- 日本国内における統計的生命の価値についてシステマテックレビュー及びメタ分析を行ったところ、中央値で4.54億円となった。
  - **米国および英国と比べて、同程度か少し低め**（米国は、9百万ドル(USNRC, 2022)~10.7百万ドル(USEPA, 2024)、英国は1百万ポンド(HSE, 2001)）。
  - 原子力関連の単位死亡リスク削減費用と比較すると、HCVSや避難及び屋内退避と同程度（数億~10億）、フィルタベントや食物出荷制限（長期、コメ）の数十分の一程度。
- 単位死亡リスク削減費用について、他の環境リスクや防護措置の条件に関して比較してみると以下のような傾向がある。
  - 原子力分野での比較
    - HCV、避難、屋内退避及び食物出荷制限（短期、野菜）について、数億~20億円程度。
    - **事故条件や防護措置の実施方法で桁レベルで変動する**（例：屋内退避の費用の幅は放出量の異なる事故シナリオによる変動。出荷制限の費用の幅は、事故後の時期や対象品目による変動）。
    - **HCV（数億~10億円程度）で採用、フィルタベント（数10億~100億円程度）不採用という判断は、英国の著しい不均衡に関するテストの際の判断と整合性がある（GDF10倍程度）。**

➤ 他の環境リスクとの比較

- 米国における先行研究と中央値で比較すると、薬関連、傷害関連及びラドン管理は数億円程度であり、毒物やALARA管理等は~100億円程度となっている。原子力分野での単位死亡リスク削減費用の幅と、大きな違いはない。

■ 今回は、事前の評価(例: HCVやフィルタベント)と事後の結果(例: 1F事故後の出荷制限)を区別して整理できていない。

- 事前の評価では、フィルタベントのように単位死亡削減費用が100億円程度の場合には正当化されない。一方で、1F事故後の出荷制限のように、事後の対策の場合には、単位死亡リスク削減費用が100億円程度でも実施されることがある。
- 事後の対策については、事故に関する責任や、住民の保護などの目的があるため、経済的な観点を過度に強調すべきではなく、他の要因を考慮して正当化が行われるべきである。



- 原子力施設からの放射性物質の放出について、その後の拡散挙動の解析や影響の評価方法については、国際的にも開発がすすめられてきた。不確実さや貨幣価値化の方法に課題が残るものの、ExternE等のプロジェクトを通じて**国際的なコンセンサス**は醸成されており、概ね、開発から適用の段階へと移行しつつある。
- **原子力安全規制においても環境影響評価の結果は利用されている。**
  - 例えば、米国では、バックフィットルールにおいて費用便益分析を行う際のオフサイト解析において利用され、定量的な分析の基礎的な情報を提供している。
    - HCVは**単位死亡リスク削減費用が数億円~10億円程度で正当化され、フィルタベントは数10億~100億円程度で正当化されず。**(この結果は、**英国の「著しい不均衡に関するテスト」**や他の環境リスクでの評価結果と整合性がある)。
    - 最終的な決定では、不確実さの考慮や定性的要因の考慮などと組み合わせて判断が行われる。
- 今回は、事前の評価(例: HCVやフィルタベント)と事後の結果(例: 1F事故後の出荷制限)を区別して整理できていないので、事前と事後における判断の違いとその根拠について整理が必要。

- EC, 1999, "ExternE, Externality of Energy, Vol. 10 NATIONAL IMPLEMENTATION," European Commission.
- EC, 2003, "External Costs, Research results on socio-environmental damages due to electricity and transport," European Commission, Luxembourg.
- EC, 2005, "ExternE, Externalities of Energy, METHODOLOGY 2005 UPDATE," European Commission.
- Hirschberg, S., G. Spikerman and R. Dones, 1998, "Severe Accidents in the Energy Sector," Paul Scherrer Institut, Switzerland.
- HSE, 2001, Reducing risks, Protecting people, HSE's decision-making process.
- IAEA, 1999, Technical Reports Series No. 394, Health and Environmental Impacts of Electricity Generation Systems: Procedures for Comparative Assessment.
- Kajihara H., S. Ishizuka, A. Fushimi and A. Masuda, 1999, Exposure assessment of benzene from vehicles in Japan, Proceedings of the 2nd International Workshop on Risk Evaluation and Management of Chemicals, 62–70.
- A. Kishimoto, T. Oka, K. Yoshida and J. Nakanishi, 2001, Cost effectiveness of reducing dioxin emissions from municipal solid waste incinerators in Japan, Environ. Sci. Technol., 35, 2861–6.
- Nakanishi J., T. Oka and M. Gamo, 1998, Risk/benefit analysis of prohibition of the mercury electrode process in caustic soda production, Environ. Eng. Policy, 1, 3–9.
- Oka T., M. Gamo and J. Nakanishi, 1997, Risk/benefit analysis of the prohibition of chlordane in Japan: An estimate based on risk assessment integrating the cancer risk and the noncancer risk, Jpn. J. Risk Anal., 8, 174–86.
- Takahara S. and T. Homma, 2008, Analysis for Relocation Strategy Using the Method of Probabilistic Accident Consequence Assessment, Proc of IRPA12.
- Takahara et al., 2019, Assessment of Radiation Doses from Ingestion Pathway to the Public in Fukushima Prefecture after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, Proc of ASRAM 2019.
- Tengs et al., 1995, Five-hundred life-saving interventions and their cost-effectiveness, Risk Anal., 15, 369–390.
- USEPA, 2024, Guidelines for Preparing Economic Analysis, Third edition, EPA-240-R-24-001.
- USNRC, 2017, NUREG/BR-0058 Rev.5, Regulatory Analysis Guidelines.
- USNRC, 1997, NUREG/BR-0184, Technical Evaluation Handbook.
- USNRC, 2012, Consideration of Additional Requirements for Containment Venting System for Boiling Water Reactors with Mark I and Mark II Contaminants, SECY-12-0157.
- USNRC, 2015, Evaluation of the Containment Protection and Release Reduction for Mark I and Mark II Boiling Water Reactors Rulemaking Activities, SECY-15-0085.
- USNRC, 2015, Staff Requirements – SECY-15-0085 – Evaluation of The Containment Protection and Release Reduction for Mark I and Mark II Boiling Water Reactors Rulemaking Activities, SRM-SECY-15-0085.
- USNRC, 2022, NUREG-1530 Rev.1, Reassessment of NRC's Dollar Per Person-Rem Conversion Factor Policy.

小山良太, 2013, 風評被害と農林漁業の再建, 農村計画学会誌, 31, 572-575

岡敏弘, 1999, 環境政策論, 岩波書店.

岡敏弘, 2012, 食品中放射性物質規制への費用便益分析の適用, 保健物理, 47 (3), 181~188.

原子力災害対策本部(2011), 原子力安全に関するIAEA閣僚会議に対する日本国政府の報告書-東京電力福島原子力発電所の事故について-

高原省五, 本間俊充, 2009, リスク情報を活用した緊急時対応計画の検討 (3)原子力緊急事態における防護措置のリスク低減費用の検討, 日本原子力学会2009年春の年会, .

中西準子, 1995, 環境リスク論, 岩波書店, 東京.

廣内淳, 森愛理, 成川隆文, 高原省五, 原子力緊急事態における防護戦略の最適化のための検討, (1)原子力災害対策指針に基づく防護戦略による回避線量, 日本原子力学会2025年秋の大会.

藤見他, 2023, 日本における統計的生命価値のメタ分析, 土木学会論文集, 79, 20, 23-20008.

松木良夫, 高原省五, 本間俊充, 村松健, エネルギー産業における過酷事故事例及び事故時の影響評価結果に関する分析(受託研究), JAEA-Review 2008-029.

- SECY NRC職員が委員会に提出する報告書。政策、規則制定、および裁定事項について委員会に情報を提供するための文書。
- SRM Staff Requirements Memoranda(委員会の決定に関する文書化(職員作成の議題文書に基づくもの)、および職員に割り当てられた関連業務(締切日を含む)。)

## 参考資料

- 事故の経験をデータベース化し、類推により影響を評価する方法
  - スイス・ポールシェラー研究所の過酷事故データベースENSAD (Energy-related Sever Accident Data base) が有名 (Hirschberg et al., 1998)。
    - 6種類のエネルギー源について、1996年までの事故について、燃料の採掘から廃棄物処分まで、各段階の事故を収集。
    - エネルギー産業の事故(4290件)を、死亡者数5人以上、負傷者10人以上、避難者数200人以上、被害総額500万ドル以上の事故を過酷事故と定義

	対象期間	段階区分
石炭	1945年～1996年	鉱脈、石炭採掘・出荷準備、精製プラントへの輸送、精製処理、輸送、発電・熱供給プラント、廃棄物処理、廃棄物処分
原油	1969年～1996年	油田、採掘、精油所への輸送、精油所、地域配送、発電・熱供給プラント
天然ガス (LPG含む)	1969年～1996年	ガス資源探査、採掘と処理、長距離輸送(パイプライン)、遠隔地・地域・局地配送、発電プラント、熱供給プラント
水力	1850年～1996年 1930年～1996年	ダム崩壊事故データを用いた事故発生頻度の算出
原子力	—	TMI事故、チェルノブイリ事故

Hirschberg et al.(1998)のTable D.1をもとに著者作成

発生日	施設名(1)	放出放射(Bq)(2)	死亡数		汚染面積(km <sup>2</sup> )	避難数	損害額
			急性	晩発性			
1955年 7月15日	アウエ 鉱山	na <sup>(3)</sup>	33	na	na	na	na
1957年 9月29日	キシテム 再処理プラント	$7.4 \times 10^6$	na	~125	Cs-137又はSr-90が $3.7 \text{ kBq/m}^2$ を 超える面積 ~23,000	10,800 <sup>(4)</sup>	na
1957年 10月8日	ウィンズケール 原子炉火災事故	$1 \sim 5 \times 10^{15}$	0	~100	牛乳禁止の面積 520	0	£ 60,000 <sup>(5)</sup>
1967年	カラチャイ湖	$2.2 \times 10^{13}$	na	16	Cs-137が $3.7 \text{ kBq/m}^2$ を超える面積 1,800~2,700	0	na
1979年 3月28日	スリーマイルアランド 原子力発電所	$3.7 \times 10^{17}$	0	~1	0	144,000	$\sim 5 \times 10^9 \text{ US\$}$
1986年 4月26日	チョルノービリ 原子力発電所	$1.2 \sim 1.5 \times 10^{19}$	31	7,000~ 30,000	Cs-137が $37 \text{ kBq/m}^2$ を超える面積 ~154,620 <sup>(6)</sup>	115,000~ 135,000 <sup>(7)</sup>	$20 \sim 320 \times 10^9 \text{ US\$}$
1993年 4月6日	トムスク 再処理・軍事プラント	$2 \sim 4 \times 10^{13}$	na	na	10 $\mu\text{R/h}$ を超える面積 ~100	0	na

(1) 死亡者数5人以上、負傷者数10人以上、避難者数200人または損害額500万ドル(1996年価値換算値)以上の事故のみ掲載。

(2) 大気中へ放出された放射能。核種成分の記録は無い。この表だけでは、事故の影響の比較は出来ない。

(3) 「na」は情報がないこと示す。

(4) 事故発生後、18ヶ月以内に避難した住民数。その後、1990-1995年にかけて、ウクライナ、ベラルーシ及びロシアにおいて約20万人が移転している。

(5) 事故の影響で使えなくなったミルクの損害額だけを含む。

(6) この面積は、最も影響を受けたロシア、ベラルーシ、ウクライナの3カ国のものだけを含む。

(7) 恒久的な避難。1986年に避難した住民の数。事故後の10年間で、他のグループも移住しているが、自発的な移住者と区別された報告書がないので、上の表からは除外した。

発生日	施設名	放出放射(Bq)	死亡数		汚染面積(km <sup>2</sup> )	避難数	損害額
			急性	晩発性			
1999年 9月11日	JCO 燃料加工施設	I-131: $2.5 \times 10^9$ <sup>(1)</sup> Cs-137: $2.6 \times 10^7$ <sup>(1)</sup>	2	0	350m内で避難 10km内で屋内退避 <sup>(1)</sup>	~150 <sup>(1)</sup>	$1.51 \times 10^{10} \text{ yen}$ <sup>(2)</sup>
2011年 3月11日	東京電力福島第一 原子力発電所	I-131: $1 \sim 5 \times 10^{18}$ <sup>(3)</sup> Cs-137: $6 \sim 20 \times 10^{16}$ <sup>(3)</sup>	0	(3)	5mSv/y, 20mSv/yを超える面 積 <sup>(11)</sup> 1778km <sup>2</sup> , 515km <sup>2</sup>	146,520 <sup>(11)</sup>	$11.6 \times 10^{12} \text{ yen}$ <sup>(13)</sup>

(1) 日本原子力学会JCO事故調査委員会, JCO臨界事故その全貌の解明 事実・要因・対応, 東海大学出版会(2005)

(2) 文部科学省HP「JCO臨界事故時の原子力損害賠償対応について」([https://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chousa/kaihatu/007/shiryo/attach/1367177.htm](https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/kaihatu/007/shiryo/attach/1367177.htm))

(3) UNSCEAR, UNSCEAR 2013 Report, Vol. 1, Report to the General Assemblyに基づく。

(4) UNSCEAR(2013)では、固形がんについて、「被ばく集団での健康影響の発生率における一般的な放射線被ばくに関連した上昇は、ベースラインとなるレベルに比べて識別できるようにするとは考えられない。」とし、甲状腺がんは、「幼少期および小児期により高い甲状腺線量を被ばくした人について識別可能な程度に甲状腺がんの発生率が上昇する可能性があるかどうか確固たる結論を導くことはできない。線量が大幅に低いため、チェルノブイリ原発事故後に観察されたような多数の放射線誘発性甲状腺がんの発生を考慮に入れる必要はない。」としている。

(5) 東京電力福島原子力発電所事故調査委員会, 国会事故調報告書(2012)の第4部「被害の状況と被害拡大の要因」に基づく。

(6) 東京電力HP「賠償金のお支払い状況」([https://www.tepco.co.jp/fukushima\\_hq/compensation/results/index-j.html](https://www.tepco.co.jp/fukushima_hq/compensation/results/index-j.html))

- スイスのPSIが収集したデータベース (Hirschberg et al., 1998) をもとに、過酷事故の統計分析を実施。

影響指標		石炭	原油	天然ガス	LPG	水力	原子力
死傷者数 5人以上の事故	発生件数	187	334	86	77	9	1
	死傷者総数 (1件当たり)	8,272 (44)	15,623 (47)	1,482 (17)	3,175 (41)	5,140 (571)	31 (31)
	GWe/年当りの 死亡者数	0.34	0.42	0.085	3.3	0.88	0.008
負傷者数 10人以上の事故	発生件数	28	187	62	72	2	1
	負傷者総数 (1件当たり)	1,698 (61)	16,463 (88)	3,735 (60)	13,439 (187)	1,136 (568)	370 (370)
	GWe/年当りの 負傷者数	0.070	0.44	0.21	14	0.20	0.10
避難者数 200人以上の事故	発生件数	0	65	18	29	3	2
	避難者総数 (1件当たり)	0 (0)	269,740 (4,150)	103,290 (5,738)	505,564 (17,433)	199,000 (66,333)	279,000 (139,500)
	GWe/年当りの 避難者数	0	7	6	522	34	76
経済損害 500万US \$ 以上の事故 (1996年換算価値10 <sup>4</sup> \$)	発生数	7	226	15	27	7	2
	損害総額 (1件当たり)	495 (71)	23,772 (105)	1,520 (101)	1683 (62)	3607 (515)	344,627 (172,314)
	GWe/年当りの 経済的損失	0.020	0.64	0.087	1.7	0.62	93

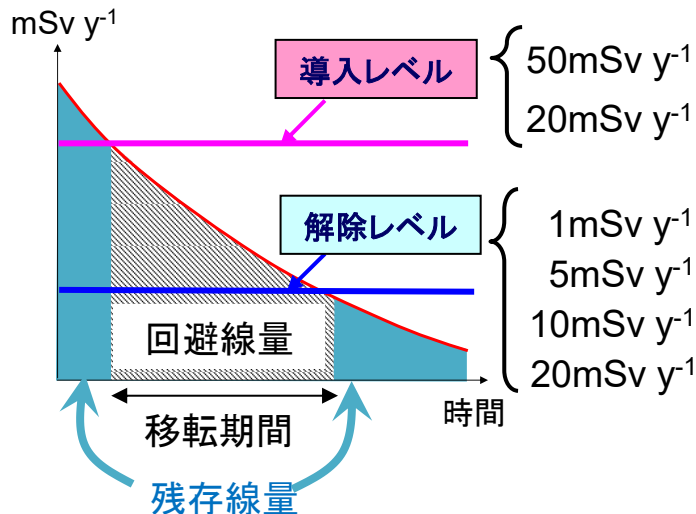
松木他(2008)の表2.8をもとに作成。

なお、松木他の表は、Hirschberg et al.(1998)のTable F4, F6, F8, F10を整理して作成したものである。



# 例：一時移転の単位リスク削減費用

## 避難モデル



## 費用の算定

避難費用:  $X$  (円)

$$X = k \cdot t \cdot N$$

$k$  : 避難費用 (60万円/人・年)

$N$  : 避難人数

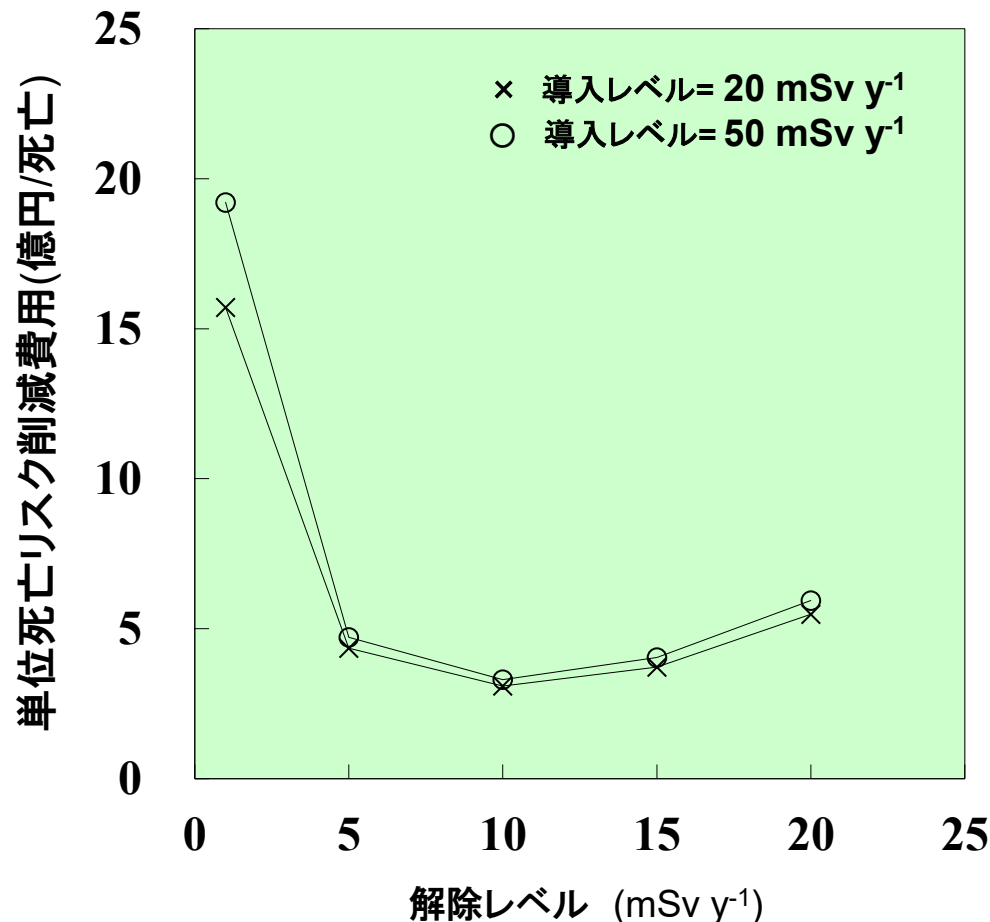
$t$  : 避難年数 (ICRP Publ. 63)

残存線量による損害:  $Y$  (円)

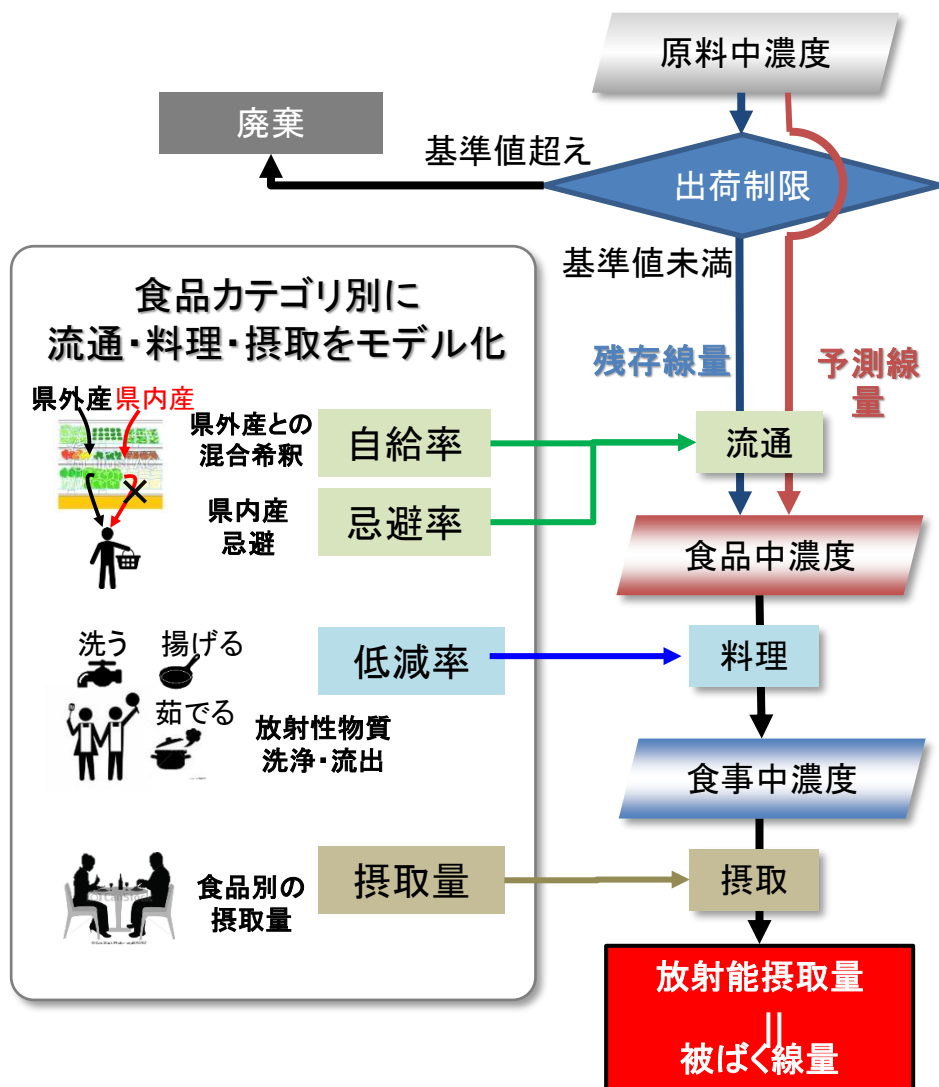
$$Y = \alpha \cdot S$$

$S$  : 残存する集団線量 (人 Sv)

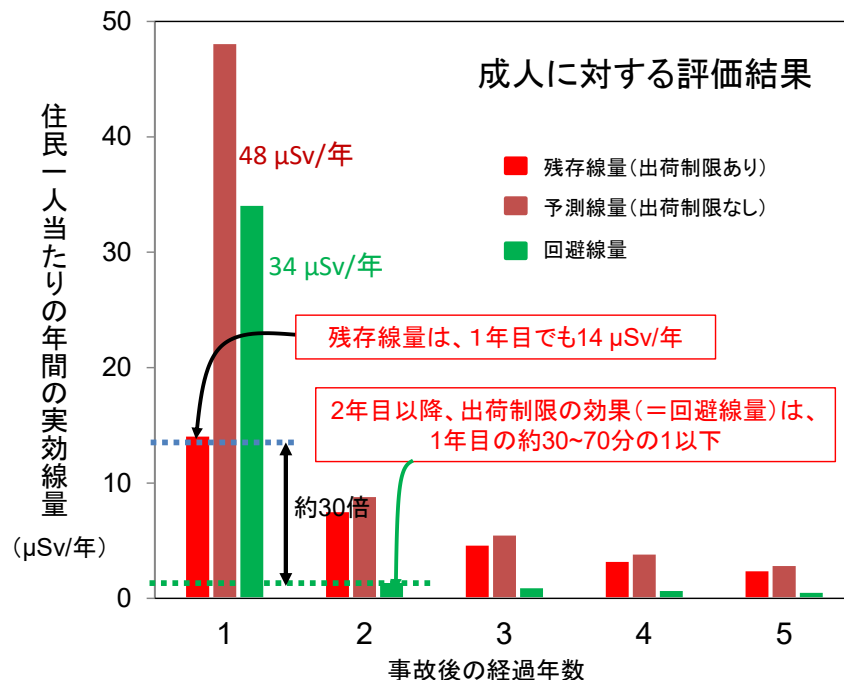
## 単位リスク削減費用の評価結果



## ■ 食物摂取による線量評価モデル



## ■ 線量評価の結果



## ■ 費用と単位死亡リスク削減費用

### ➤ 費用

作付制限・出荷制限地域の農業生産に該当する金額として 1077億円(小山, 2013)

### ➤ 単位がん死亡リスク削減費用

$$\frac{1077\text{億}}{k \cdot S \cdot N} = 116\text{億円/死亡リスク}$$

$k$  名目リスク係数(成人) (0.042  $\text{Sv}^{-1}$ )

$N$  成人人口 (県北・県中65万人)