

# 原子力発電所の事故リスクコスト 試算の考え方

第2回 原子力発電・核燃料サイクル技術等検討小委員会  
2011年10月13日

(財)電力中央研究所  
谷口武俊

# 外部性(Externality)

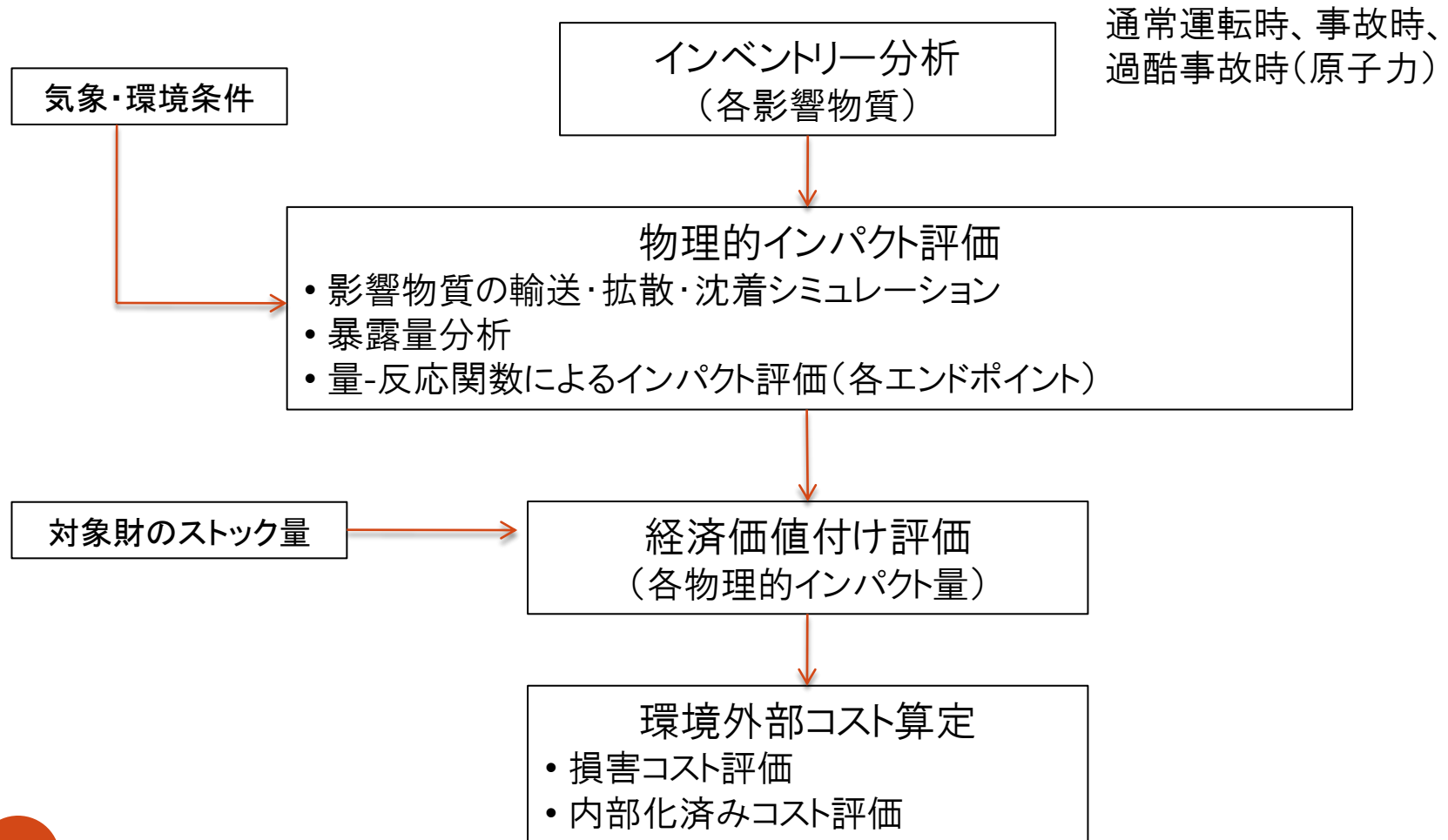
- ある主体の活動が、本来その活動とは無関係の第三者、または社会全体に市場を経由することなく無償で、直接または間接的に影響を与えるとき、「外部効果が存在する」という。
- 正の外部性(外部便益)、負の外部性(外部費用)
- 環境外部性、非環境外部性
  - 発電システムの場合
    - 環境外部性
      - 人間の生命・健康への影響、農作物／森林／漁業への影響、材料／建物への影響、可視性／アメニティ／騒音、生物多様性への影響、地球環境への影響
    - 非環境外部性
      - 市場の失敗(職業人の健康コスト、収入・雇用への影響、公共インフラへの影響)、エネルギーセキュリティ、政府の失敗(研究開発への助成金、賠償責任、規制実施の行政コスト)

# 発電システムの外部性評価研究の意義と活用

- エネルギー・電源開発利用の包括的な政策・計画
  - 多様なリスクの考慮
  - 多様な技術選択肢を同じ土俵で扱う(level playing field)
- 外部コスト内部化方策の検討
  - 外部コストの最適水準への誘導
  - 経済的手段の活用
- エネルギー・環境問題に関する理解の促進
  - 教育・情報公開を通じた研究成果の社会への提供
- 関連研究分野の発展への寄与
  - 環境影響評価の高度化(環境・生態系リスク評価手法の開発)
  - 費用効果分析(政策評価、環境会計)における基盤情報の提供
  - 自然科学(環境科学、疫学など)・社会科学(経済学、社会心理学など)における重点課題の同定
  - 学際的研究への挑戦の機会

# 発電システムの環境外部コスト評価の方法

## Impact-Pathway Damage Function Approach



# 物理的インパクトの経済価値付けの考え方

- 生命・健康リスク
  - 統計的生命価値(Value of Statistical Life)  $VSL = \Delta WTP^{R_{death}} / \Delta R_{death}$
  - 統計的疾患価値(Value of Statistical Illness)  $VSI = \Delta WTP^{R_{illness}} / \Delta R_{illness}$
  - 疾病コスト(Cost of Illness: 医療費用及び時間損失)
- 非市場財のWTP(支払い意思額)／WTA(受入れ補償額)の測定: 顕示選好調査(ヘドニック賃金法など)、表明選好調査(CVM、コンジョイント分析など)

VSLの例: ExternEプロジェクト (3.3MECU(1999), €1M(2005))  
USEPA(\$4.8M(1990\$), \$7.9M(2008\$))

測定上の課題: リスク変化量に対するWTPの信頼性(スコープ反応性)の検証、リスクの背景のWTPへの影響の検証(年齢、リスクベースライン、災害忌避、リスクのラベル、リスクの潜在期間、利他的選好)

# 物理的インパクトの経済価値付けの考え方

- 農作物／森林／漁業への影響、材料／建物への影響
  - 市場価格(農林水産物生産額、修復費用、リプレース費用など)の利用
- 生態系(生物多様性)への影響
  - 環境財価値(User value, Option value, Existence value)の測定
- 地球環境への影響
  - GHGs排出抑制コストの利用
  - 統合評価モデル(排出シナリオ、気候モデル＋経済モデル)分析

# 発電システムの環境外部コスト評価の実施状況

- 各種発電システム(化石燃料、原子力、再生可能エネルギーの燃料サイクル全体を対象) 1980年代終り～2000年代半ば
  - Pace Univ. Study, California Energy Commission, New York State Environmental Externalities Cost Study, USDOE-EC Cycle Study, Inter-agency Project: DECADES, ExternE Project
- 原子力発電所の環境外部コスト評価(国内での例)
  - 日本原子力産業会議、“大型原子炉事故の理論的可能性と公衆損害に関する試算(科学技術庁受託)”、1960年
  - T. Taniguchi & A. Omoto, “Public Health Risks of Nuclear and Fossil Power Plants in Japan”, PSAM5, Osaka, 2000
  - 朴勝俊、“原子力発電所の事故被害額試算、2003年

## External and Direct Costs of Electricity Generation in the EU (m€/kWh)

<b>External costs</b>	<b>Coal &amp; Lignite</b>	<b>Oil</b>	<b>Gas</b>	<b>Nuclear</b>	<b>Biomass</b>	<b>Solar PV</b>	<b>Wind</b>
Austria			11-26		24-25		
Belgium	37-150		11-22	4-4.7			
Germany	30-55	51-78	12-23	4.4-7	28-29	1.4-3.3	0.5-0.6
Denmark	35-65		15-30		12-14		0.9-1.6
Spain	48-77		11-22		29-52		1.8-1.9
Finland	20-44				8-11		
France	69-99	84-109	24-35	2.5	6-7		
Greece	46-84	26-48	7-13		1-8		2.4-2.6
Ireland	59-84						
Italy		34-56	15-27				
Netherlands	28-42		5-19	7.4	4-5		
Norway			8-19		2.4		0.5-2.5
Portugal	42-67		8-21		14-18		
Sweden	18-42				2.7-3		
UK	42-67	29-47	11-22	2.4-2.7	5.3-5.7		1.3-1.5
<b>Direct costs</b>	<b>32-50</b>	<b>49-52</b>	<b>26-35</b>	<b>34-59</b>	<b>34-43</b>	<b>512-853</b>	<b>67-72</b>

(OECD/NEA 2003)

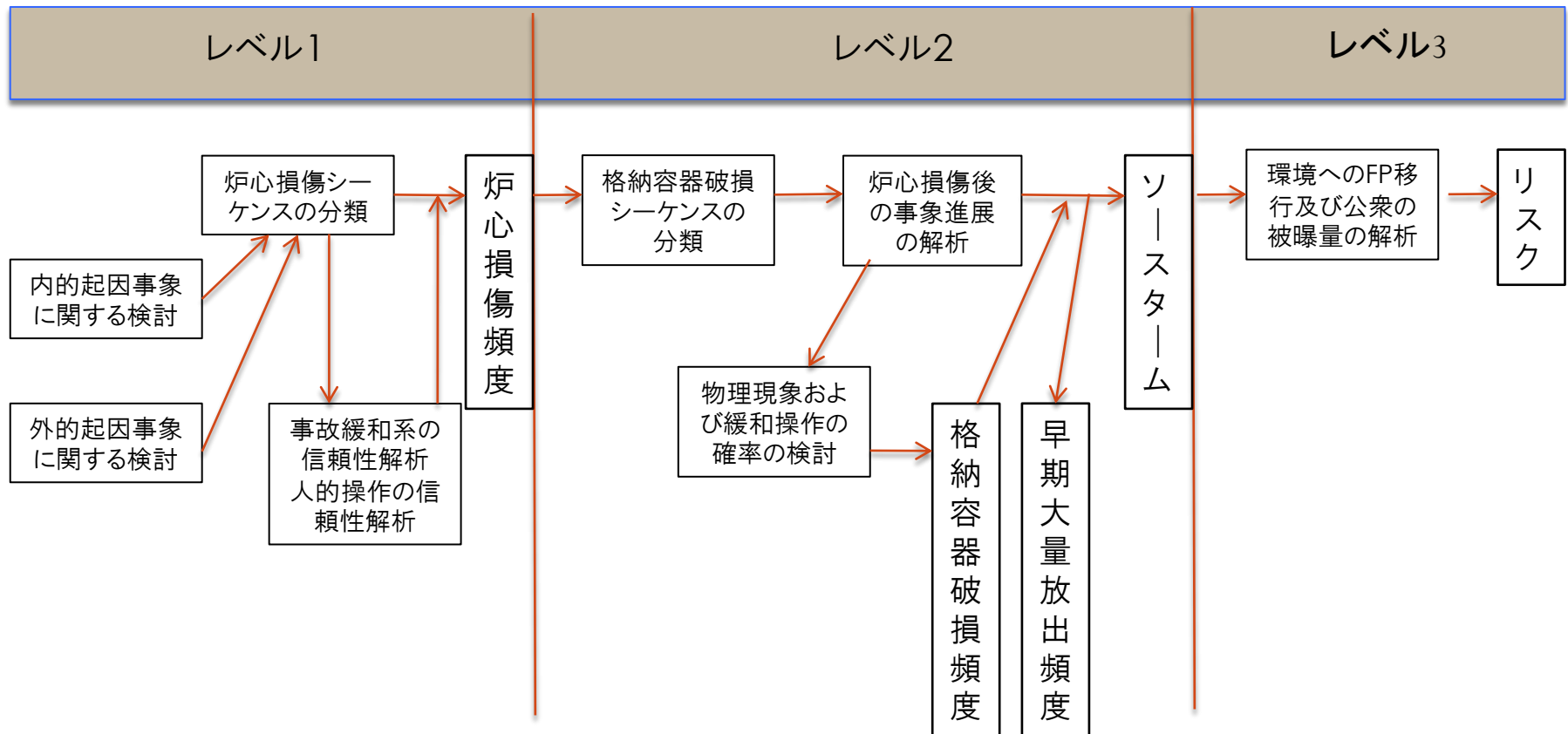


## Direct external costs of a severe nuclear reactor accident

Core melting probability (per reactor.year)	1E-05
Conditional probability for release	0.19
Total cost of accident damages (M€), including:	17 093
Cost of health impacts	
Local	1 525.2
Regional	9 318.6
Cost of agricultural restrictions	
Local	3 30.7
Regional	5 820.0
Cost of evacuation and relocation	98.1
Direct external cost (m€/kWh)	0.0046

- COSYMA code and the Monetary values of life adopted in ExternE project
- 1300MWe PWR in France, 7TWh/Ry, Operation for 30years, 5 sites average
- Source term ST21 (release of 10% of noble gas from the core and 1% of the more volatile elements)
- 0% discount rate for health impacts

# 原子力発電施設の確率論的リスク評価



# 原子力発電施設の確率論的リスク評価

## レベル3: 事故影響評価 (Accident Consequence Assessment)

- MACCS2コード(USNRC):
  - 格納容器破損により大気へ放出された放射性核種の輸送、拡散、沈着の計算。一般公衆の放射線被曝による健康リスク、被曝低減を目的とした緊急時対策活動や汚染土壌の除染や土地利用禁止、農作物廃棄などによる経済損失の計算。
  - The State-of-the-Art Reactor Consequence Analysis (SOARCA) Project において、25年間の過酷事故研究成果等を組み入れ、より現実的な評価を行うために解析手法の高度化作業
  - 日本ではJNESによる“平成20年度地震時のレベル3PSAの検討(PWR及びBWR)”において平均個人リスク(急性死亡、がん死亡)および不確実性を評価。ただし、経済影響は推定していない。
- OSCAARコード(旧原研): 確率論的環境影響評価コードで、MACCSおよびCOSYMAコードとの国際比較計算で機能(経済影響モジュールを除く)の検証済み。
  - 安全目標案の検討のため、早期大規模放出となる事故シーケンスのソースタームに対する、65のパラメータの不確実さを考慮した急性死亡及びがん死亡の条件付き発生確率を評価。ただし、経済影響は推定していない。

注) OSCAAR: Off-Site Consequence Analysis Code for Atmospheric Release in Reactor Accident

# OSCAARコードの概要

- 大気拡散・沈着モデル解析モジュール
  - 放出源情報(放射性核種の放出量、放出開始時間、放出継続時間、プルームの放出熱、放出高さ、放出比、放出猶予時間など)と気象データ(広域気象、狭域気象、降水、サイト気象)を用い、大気中における放射性物質の移流・拡散及び地表面への沈着を解析し、放射性物質の大気中濃度及び地表面沈着量を算定。
  - 対象サイトで起こりうる広範な気象条件から評価に用いる気象条件を抽出(気象サンプリング)
- 早期被ばく線量算定モジュール
  - 放射性雲の通過中あるいは通過後の短期間における早期の個人及び集団の被ばく線量を算定。
  - 被ばく経路は、放射性雲からの外部被ばく、地表沈着物質からの外部被ばく、放射性雲の吸入による内部被ばく。
- 長期被ばく線量算定モジュール
  - 長期に亘って環境中に残留する長半減期の放射性核種に起因する個人及び集団の被ばく線量を算定。
  - 被ばく経路は、地表沈着物質からの外部被ばく、再浮遊物質の吸入による内部被ばく、汚染された食物(牛乳、乳製品、牛肉、穀類、根菜、葉菜)の摂取による内部被ばく。

# OSCAARコードの概要(続)

- 被ばく低減効果解析モジュール
  - 事故時の被ばく線量をより現実的に評価するため、屋内退避、避難、安定ヨウ素剤の配布、食物摂取制限、移転など緊急時防護対策の被ばく低減効果を解析。
  - 通常生活での滞在時間割合と昼間／夜間の人口割合(屋外、屋内(木造建屋、コンクリート建屋)、警告時間、退避／避難条件(放出点からの距離、指示までの時間、完了時間等)、移転条件(移転から戻る線量、移転期間、除染係数等)、摂取制限濃度が入力パラメータ。
- 健康影響推定モジュール
  - 放射線被ばくによる早期の身体的影響(死亡、疾病)、晩発性の身体的影響(致死がん、疾病)および遺伝的影響を推定。
- 経済影響推定モジュール
  - 健康影響に起因する被害額(治療コスト、治療中の所得損失、死亡による所得損失)、屋内退避や避難および移転に要する費用(生産損失、居住コスト、輸送コスト、土地及び土地以外の資本用役損失)、除染に要する費用、農畜産物の廃棄や立ち入り制限による損失などの経済的被害額、産業連関分析による負の経済波及効果を推定。
  - 都道府県別の県民総生産、人口、土地資産価値、農畜産物生産量と生産額などのデータライブラリー

## 留意事項と課題

- 発電システムのリスクおよび外部性は、カントリースペシフィックであり、サイトスペシフィックであり、テクノロジースペシフィックであることを認識。
  - 転用可能性の吟味
    - Benefit Transfer(経済価値付けにおいて、他の社会環境／政策的文脈で用いられた情報(Unit value or Function/Meta-analysis)を利用すること)
- 発電システムのリスクおよび外部性の評価では、時間的、空間的そしてモード別(通常時、事故時、過酷事故時)な区分を明確にすること。
  - 割引率の選択
- 原子力発電プラントの過酷事故(Low Probability/High Consequence事象)リスク評価に基づく環境外部コスト算定では単位発電量あたりのコスト期待値とともに、事故発生確率と総被害コストを社会に示すこと。
  - 社会的選好の測定(被害忌避、原子力忌避の考慮)
  - 不確実性の取り扱い

## 電力生産活動に関連する環境ストレス因子

### Chemical elements

- Sulphur oxides
- Nitrogen oxides
- Carbon monoxide
- Hydrocarbon
- Hydrogen sulphide
- VOCs
- Particulates
- Greenhouse gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)
- Chloride
- Phosphate
- Fluoride
- Solid wastes (Ash, FGD dust)
- Liquid waste (Acid drainage water, Brine)
- Trace elements (As, Cd, Hg, Zn, Pb, V, Cr etc)
- Radionuclides

### Physical elements

- Earthmoving
- Noise
- Thermal discharge
- Oil loss by blowout and spills at wells
- Operational oil discharge
- Gas leak by high pressure and corrosions



## 原子力発電システム：インパクトの時間分類

インパクト発生時期 被ばく時期	短期	中期	長期
短期	(急性死亡) (経済損害)	致死ガン 非致死ガン	遺伝的影響
中期	N.A.	致死ガン 非致死ガン (経済損害)	遺伝的影響
長期	N.A.	N.A.	致死ガン 非致死ガン 遺伝的影響

N.A. : Not Applicable

( ):シビアアクシデントのみ

時間的区分(ヒトの健康影響を念頭において)

短期(1,2年以内に影響が顕在化する可能性がある:急性)

中期(1生涯内に影響が顕在化する可能性がある:晩発性)

長期(次世代のヒトに影響が顕在化する可能性がある:遺伝的)



# 欧州評価例；出典ExternE(1995)

**Table 9.7 Monetary valuation for four possible source terms for a severe nuclear reactor accident**

Source term	Total cost health effects (MECU)	Total cost food bans (MECU)	Total cost evac. + reloc. (MECU)	Sub-total cost (MECU)
<b>ST2</b>				
local	11,044.1	824.0	1,515.2	
regional	43,059.0	26,809.6	-	
total				<b>83.252</b>
<b>ST21</b>				
local	1,525.2	330.7	98.1	
regional	9,318.6	5,820.0	-	
total				<b>17.093</b>
<b>ST22</b>				
local	237.5	86.0	13.5	
regional	2,023.7	978.0	-	
total				<b>3,339</b>
<b>ST23</b>				
local	39.6	13.7	10.9	
regional	303.2	63.6	-	
total				<b>431</b>

MECU  
=百万ユーロ

Note ;

- 1) Source Term ST2: release of 100% of noble gas from the core and 10% of the more volatile elements  
 ST21: release of 10% of noble gas from the core and 1% of the more volatile elements  
 ST22: release of 1% of noble gas from the core and 0.1% of the more volatile elements  
 ST23: release of 0.1% of noble gas from the core and 0.01% of the more volatile elements