

# 土壤汚染のリスク評価と リスク管理

平成24年度 土壤汚染対策セミナー

平成25年3月27日

東京農工大学大学院

細見正明

# 今日の流れ

- ・ 土壌環境保全対策の制度
- ・ 化学物質の環境リスク

リスクの比較を通じてリスク感覚への馴染み

- ・ 土壌汚染のリスク評価・ 管理

# 土壤環境保全対策の制度の在り方 に関する検討会（2000年12月）

## 土壤汚染に基づく環境リスク対策

土壤汚染による環境リスクについては、水質汚濁や大気汚染とは異なり、**土壤汚染から人への暴露経路そのものの遮断が可能**であること等から、浄化以外の被覆、封じ込め等の方法によっても、人の健康等に影響が及ぶおそれのないようにリスク低減措置を実施することでリスク管理が可能である

# 土壌環境保全対策の制度の在り方

人の健康影響に及ぼすおそれのある土壌汚染は、地下に存在し、見た目などで容易に判定しがたい

- ①土壌汚染の実態を把握する
- ②環境リスクが高ければ、適切に管理しなければならない
- ③そのために、情報を公開して、
- ④環境リスクに応じたリスク削減措置をとる

土地所有者等に調査対策の実施を求めている

# ダイオキシン類対策特別措置法

## ・汚染土壌の直接摂取による健康影響

→土壌汚染対策：溶出量基準＋含有量基準

→産業廃棄物の埋立処分基準よりも厳格

## ・ダイオキシン類汚染土壌の対策スキーム

→公共的な土地のダイオキシン汚染土壌に対し、都道府県知事がダイオキシン類汚染の除去などを含む対策を可及的速やかに講じるとともに、汚染原因者を特定し、応分の費用負担を求める制度である。(遡及効)公害事業費事業者負担法にもとづく

→対策地域の指定要件：誰もが立ち入ることができる土地。

廃棄物埋立処分場や工場などの事業場には適用されない。

・ダイオキシン類特別措置法では、公共的な事業者が環境審議会の意見を聞きながら、対策計画を策定し、実施するので、具体的な調査・対策技術については、特に定められていない。

# ダイオキシン類と有害物質による土壤汚染対策の比較

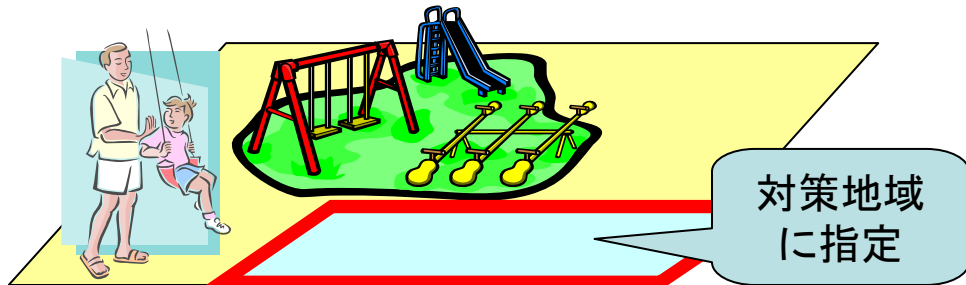
## ダイオキシン類対策特別措置法

### ダイオキシン類による土壤汚染

- ダイオキシン類は人の健康に重大な影響あり
- 土地の所有者・管理者、汚染原因者が誰かに関わらず早急な対策が必要。  
→公共事業による汚染の除去等(公共事業型)

### 都道府県知事の役割

- ・対策地域の指定
- ・地域指定の解除を目指した対策計画の策定
- ・計画に基づく対策事業の実施  
(事業実施者は計画策定者である都道府県が基本。調整により市町村実施も可)
- ・国から自治体が行う対策事業に補助
- ・都道府県知事が公害防止事業費事業者負担法に基づき汚染原因者に費用請求

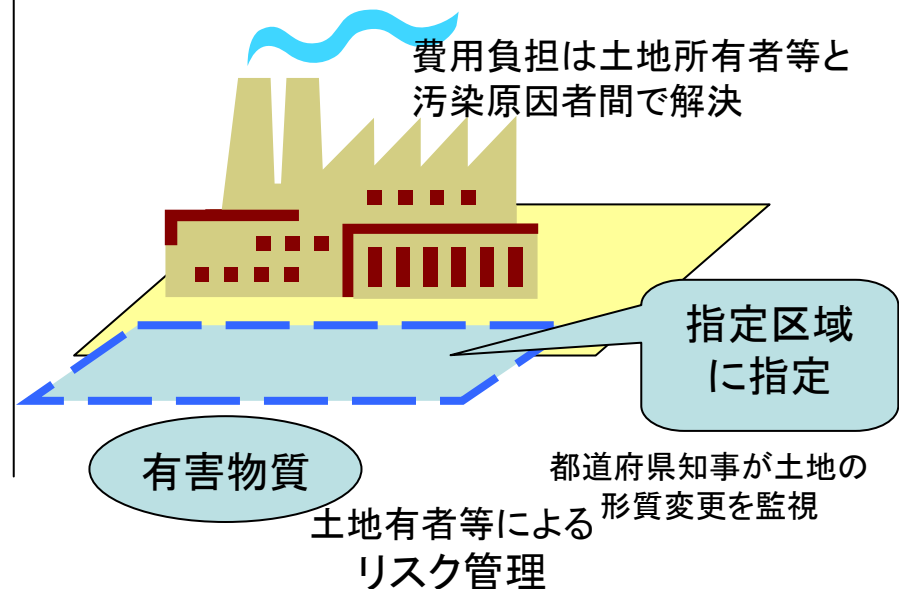


## 土壤汚染対策法

### 特定有害物質による土壤汚染

工場等の土地所有者等による調査・対策

特定有害物質によって汚染された土地による健康リスクを回避するため土地所有者等が土壤汚染の調査・対策を実施



# 化学物質によるリスクとは？

環境中に排出された化学物質が人の健康や動植物の生息又は生育に悪い影響を及ぼすおそれ(環境省)

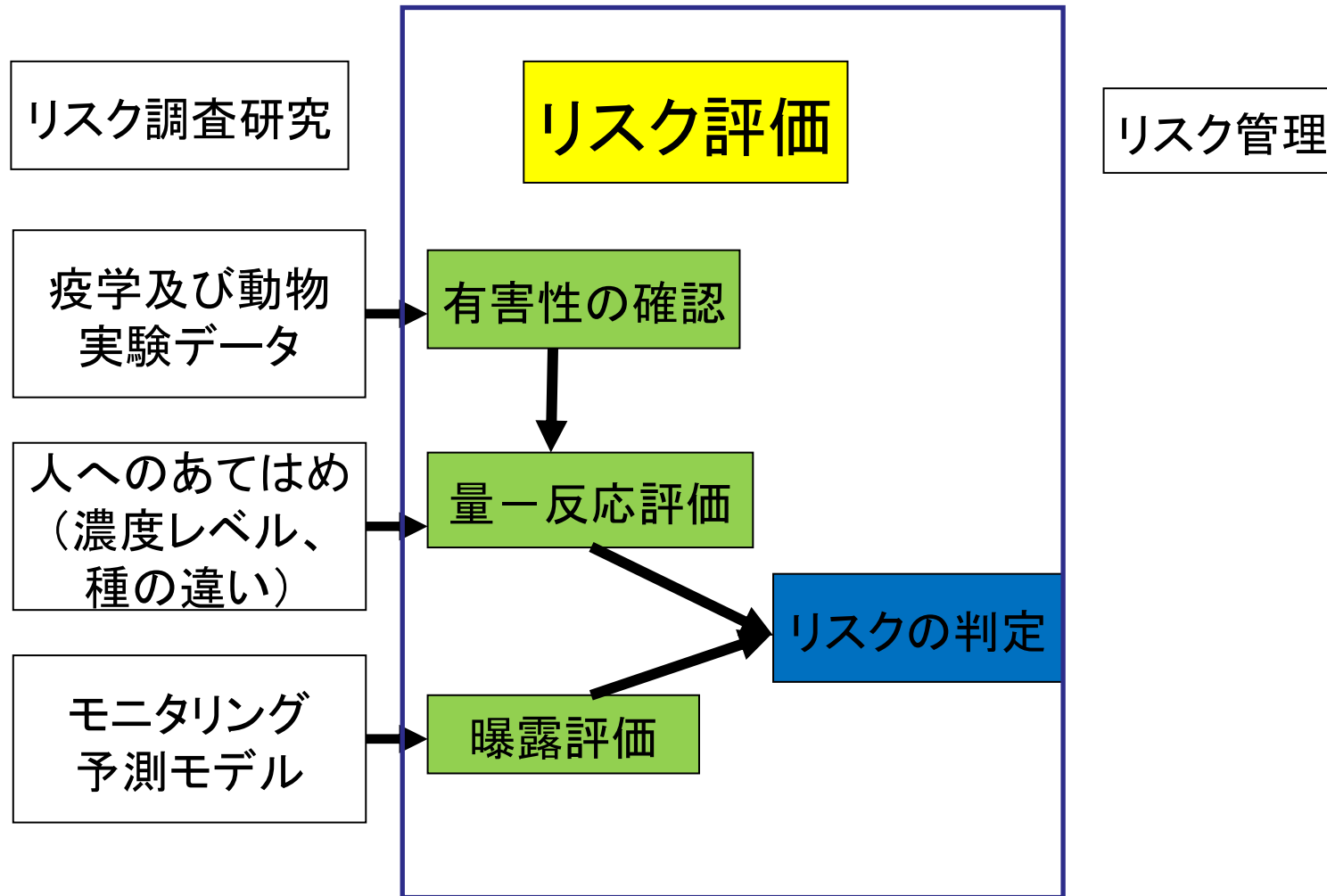
## 化学物質の

$$\text{環境リスク} = \text{有害性の程度} \times \text{暴露量}$$

化学物質による環境リスク:

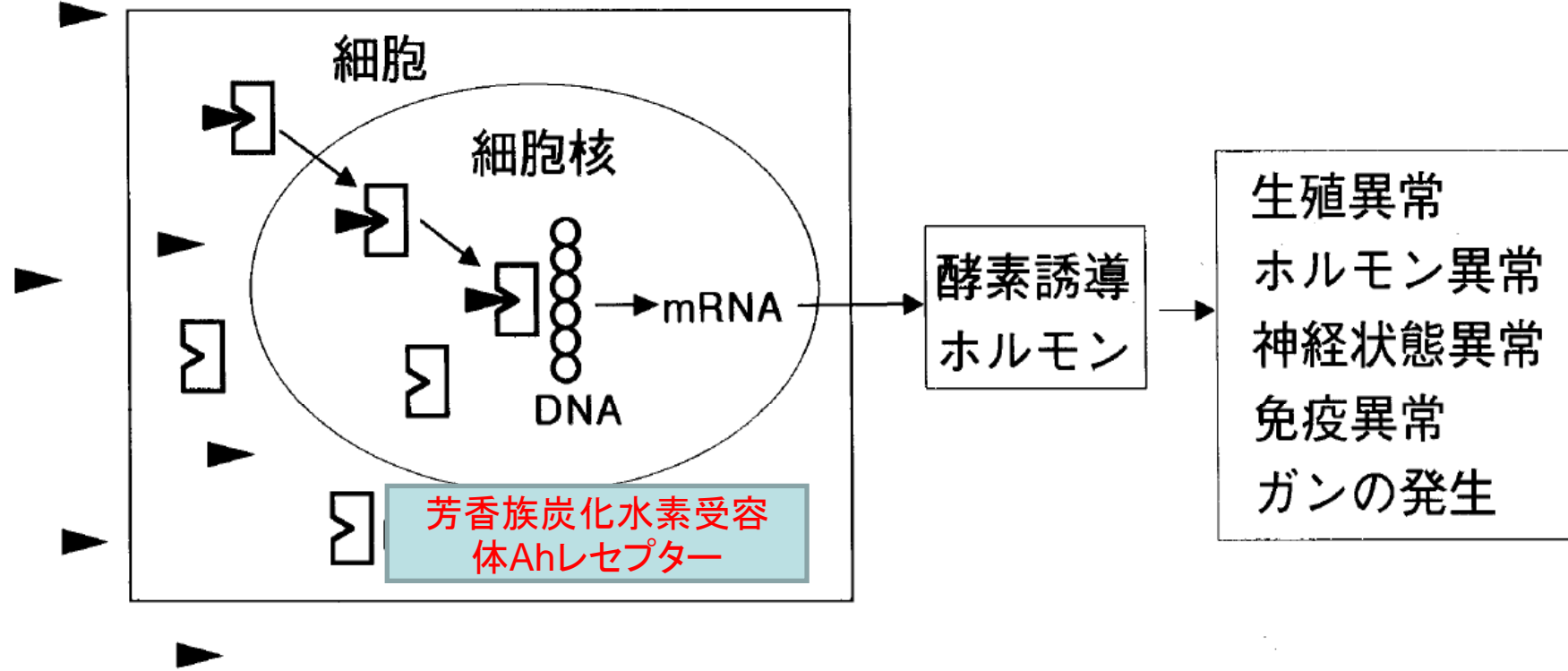
- ①人の健康に及ぼす有害な影響
- ②生物や生態系に及ぼす悪影響

# 化学物質によるリスク評価の手順



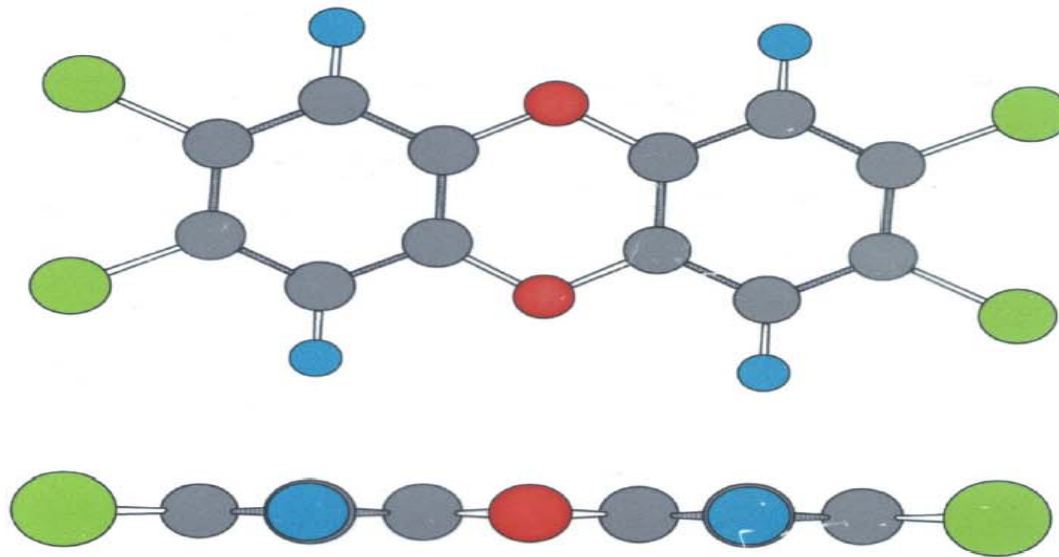


ダイオキシン



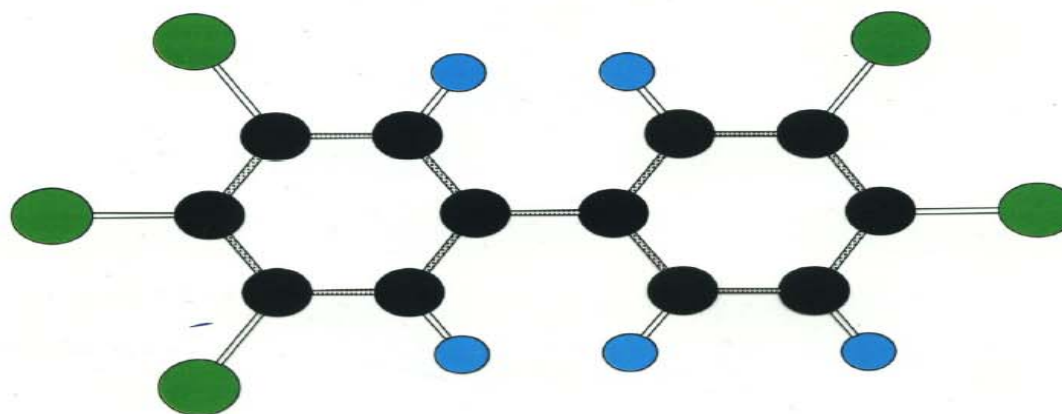
ダイオキシン類の作用メカニズム

● : 炭素、 ● : 水素、 ● : 酸素、 ● : 塩素



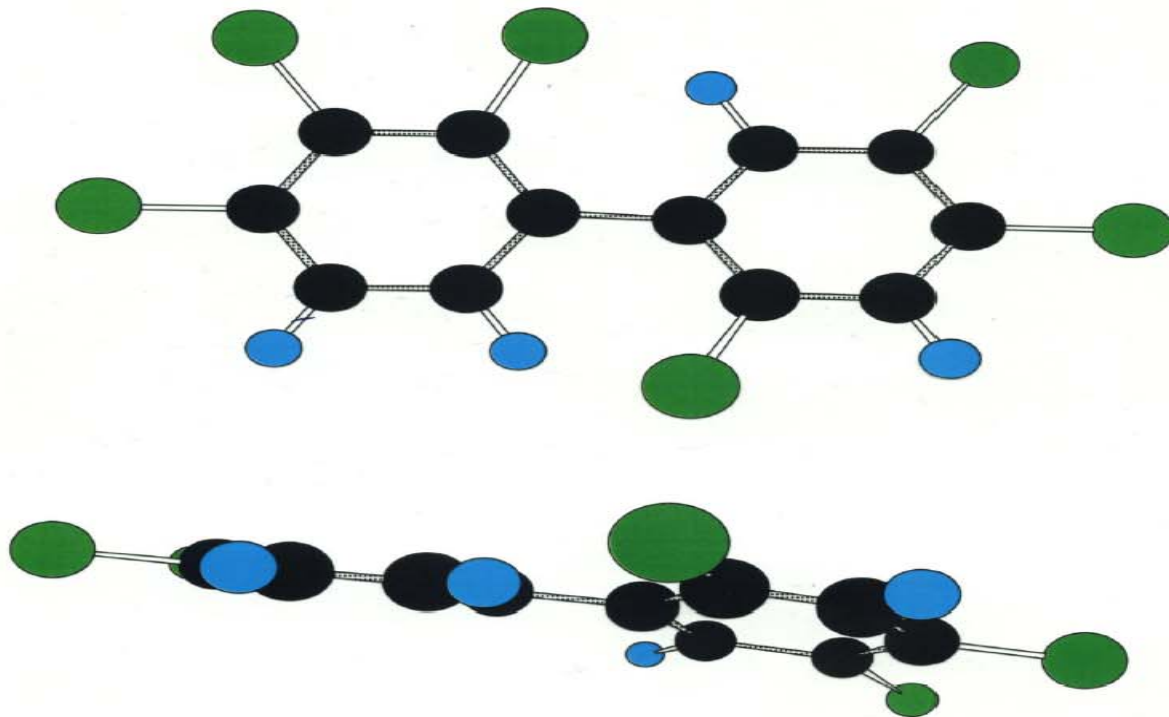
2,3,7,8-TCDD

● : 炭素、      ● : 水素、      ● : 塩素



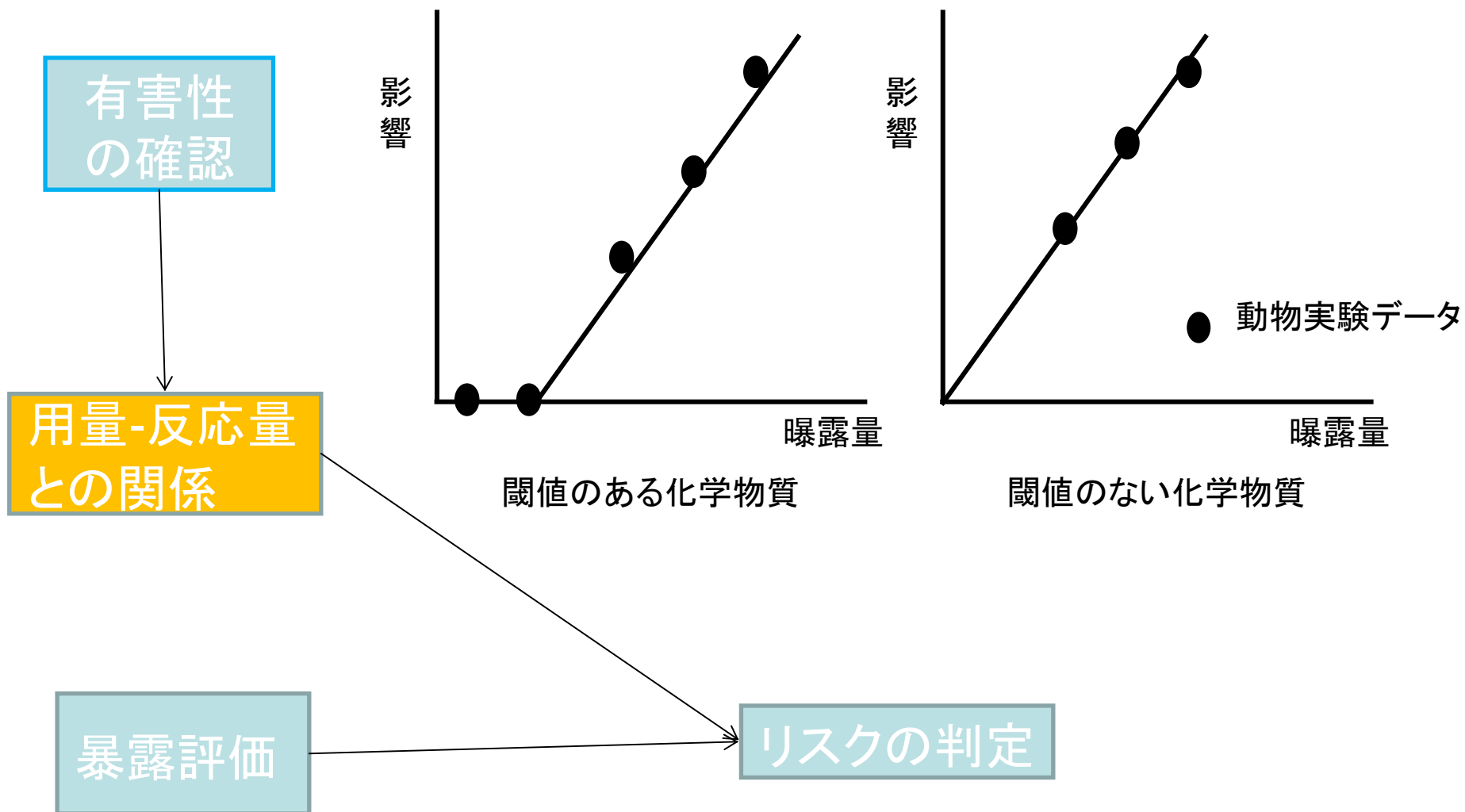
**3,4,5,3',4'-PeCB**

●: 炭素、      ●: 水素、      ●: 塩素

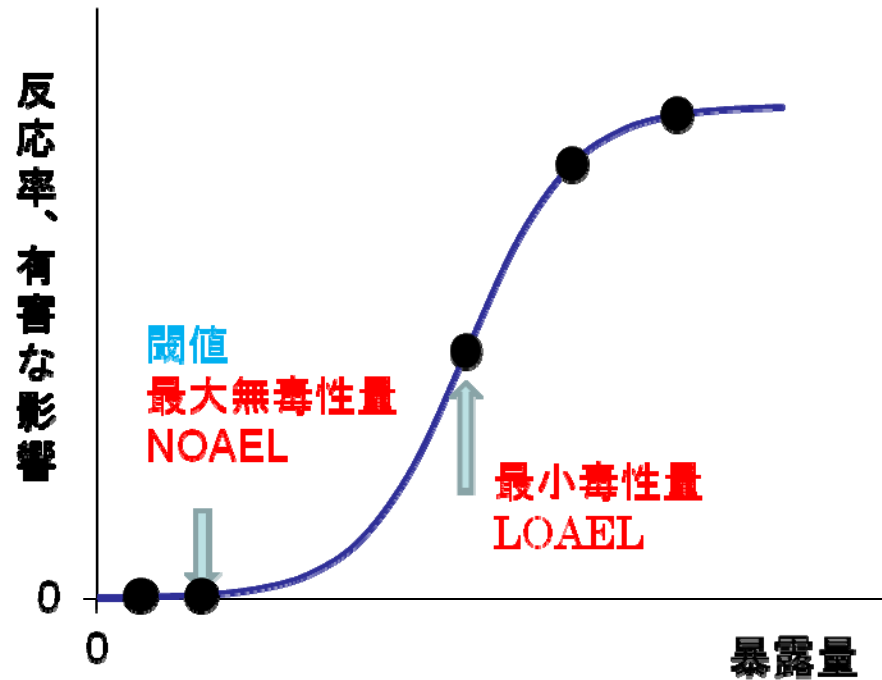


2,3,4,2',4',5'-HeCB

# ダイオキシンのリスク評価： 用量-反応量の関係



# ダイオキシン:用量－反応量の関係



閾値のある化学物質

**耐容一日摂取量 (Tolerable Daily Intake):**  
人が一生涯にわたり摂取しても健康に対する有害な影響が現れないと判断される一日当たりの摂取量

$TDI = (\text{NOAEL あるいは LOAEL}) / \text{不確実係数}$   
許容一日摂取量 (Acceptable Daily Intake)  
 $ADI = TDI$

不確実係数: ①個人差、②動物からヒトへの外挿、③毒性の重大さ、などの観点からそれぞれ10が与えられる。LOAELを使用した場合にも10が与えられる

## ダイオキシンのTDIの算出

- 最小毒性量LOAEL: 生殖発生毒性試験
- 妊娠しているラットに、2,3,7,8-TCDDを投与し、生まれた雌のラットの生殖器に形態異常
- ラット妊娠臨界期の実測体内負荷量: 86 ng/kg体重 (LOAEL) = 人のLOAEL (体内負荷量: 86 ng/kg体重)
- 人のLOAELとなるための一日摂取量  
= (体内負荷量 × ln2) / (半減期7.5年 × 吸収率50%) = 43.6 pg/kg/日

$$\text{TDI} = 43.6 \text{ pg/kg/日} / 10 \doteq 4 \text{ pg-TEQ/kg/日}$$

# わが国の曝露量推定で用いられる 媒体の摂取量と体重

曝露経路等	大人	子供
呼吸量(大気)	15 m <sup>3</sup> /日	6 m <sup>3</sup> /日
飲水量(飲料水)	2 l/日	1 l/日
直接摂食量(土壌)	100 mg/日	200 mg/日
体重	50 kg	10 kg



# H21年度ダイオキシンの曝露量 (pg-TEQ/kg体重/日)

## ①大気経由の曝露量

$$= \text{大気中の濃度 (pg-TEQ/m}^3\text{)} * \times \text{呼吸量 (m}^3\text{/日)} \div \text{体重 (kg体重)}$$

$$= 0.030 \text{ pg-TEQ/m}^3 \times 15 \text{ m}^3\text{/日} \div 50 \text{ kg体重}$$

$$= 0.0090 \text{ pg-TEQ/kg体重/日}$$

\* 一般環境と沿道での587データの算術平均値(平成21年度)

## ②土壌経由の曝露量

$$= \text{土壌中の濃度 (pg-TEQ/g)} * \times \text{土壌の摂食量 (g/日)} \div \text{体重 (kg体重)}$$

$$= 2.1 \text{ pg-TEQ/g} \times 0.1 \text{ g/日} \div 50 \text{ kg体重}$$

$$= 0.0042 \text{ pg-TEQ/kg体重/日}$$

\* 一般環境の709データの算術平均値(平成21年度)

## ③食事経由の曝露量

$$= 0.84 \text{ pg-TEQ/kg体重/日}$$

(厚生労働省の平成21年度トータルダイエツト調査結果より)

$$\text{合計 } \textcircled{1} + \textcircled{2} + \textcircled{3} = 0.85 \text{ pg-TEQ/kg体重/日}$$

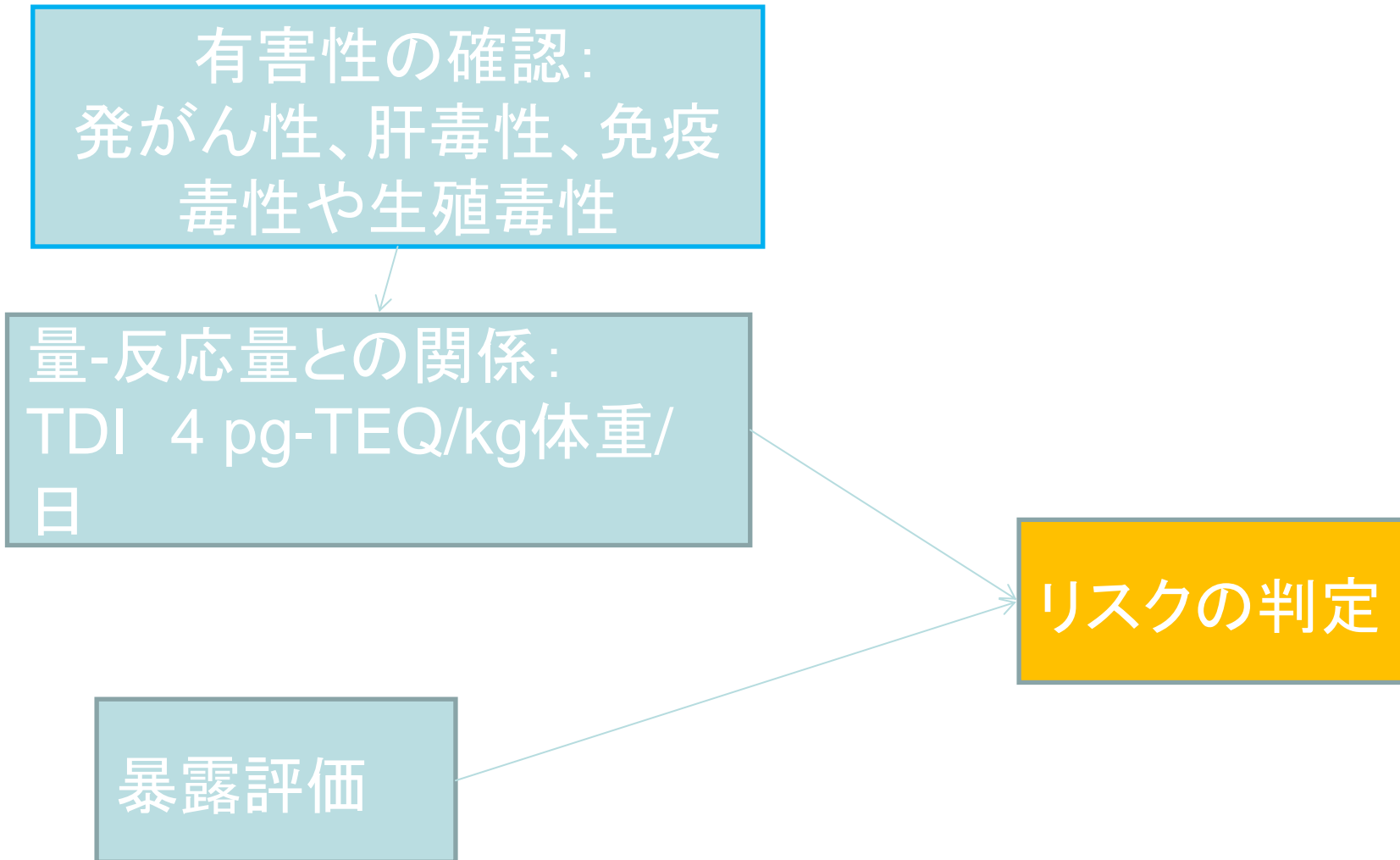
# ダイオキシンのリスク評価

有害性の確認：  
発がん性、肝毒性、免疫  
毒性や生殖毒性

量-反応量との関係：  
TDI 4 pg-TEQ/kg体重/  
日

暴露評価

リスクの判定



# 閾値のある化学物質に対する リスクの判定

ハザード比(HQ: hazard quotient)  
= 暴露量/TDI(ADI)

HQが1よりも小さければ、リスクは小さい

ダイオキシンのHQ

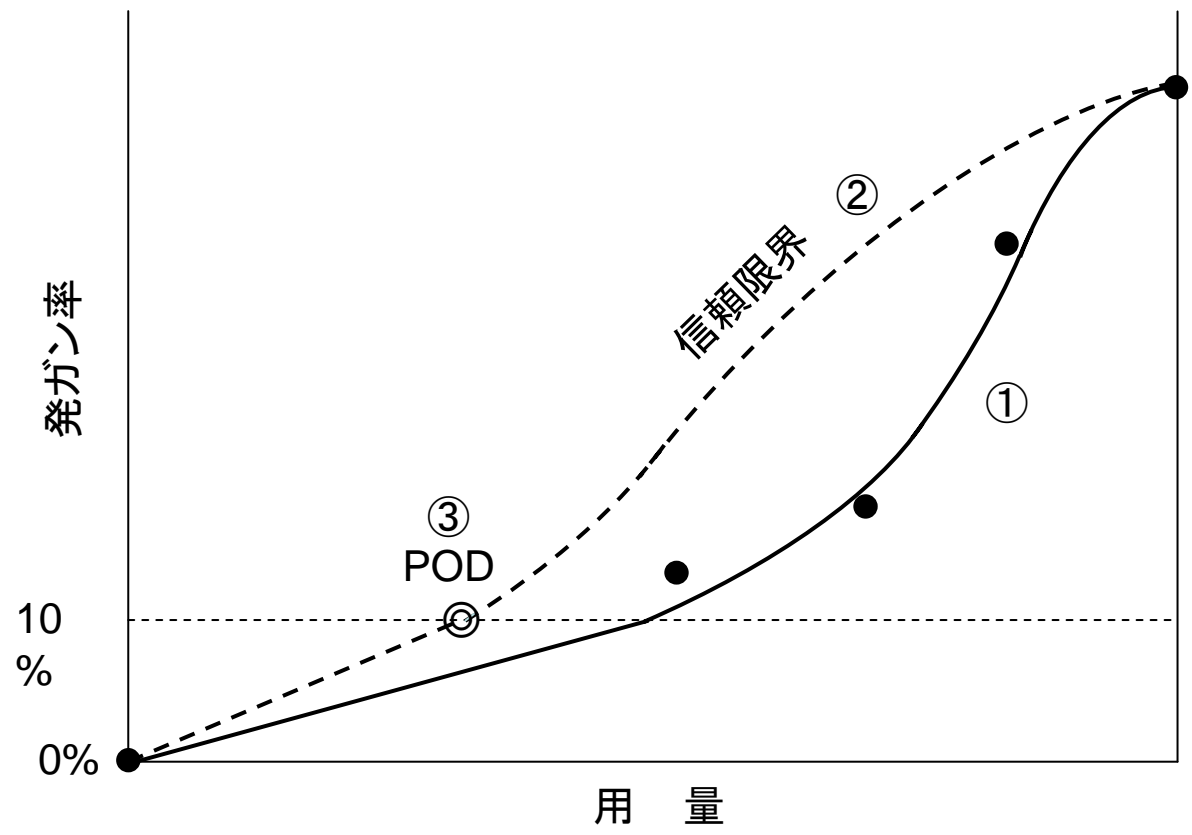
= ダイオキシン類の暴露量 / TDI

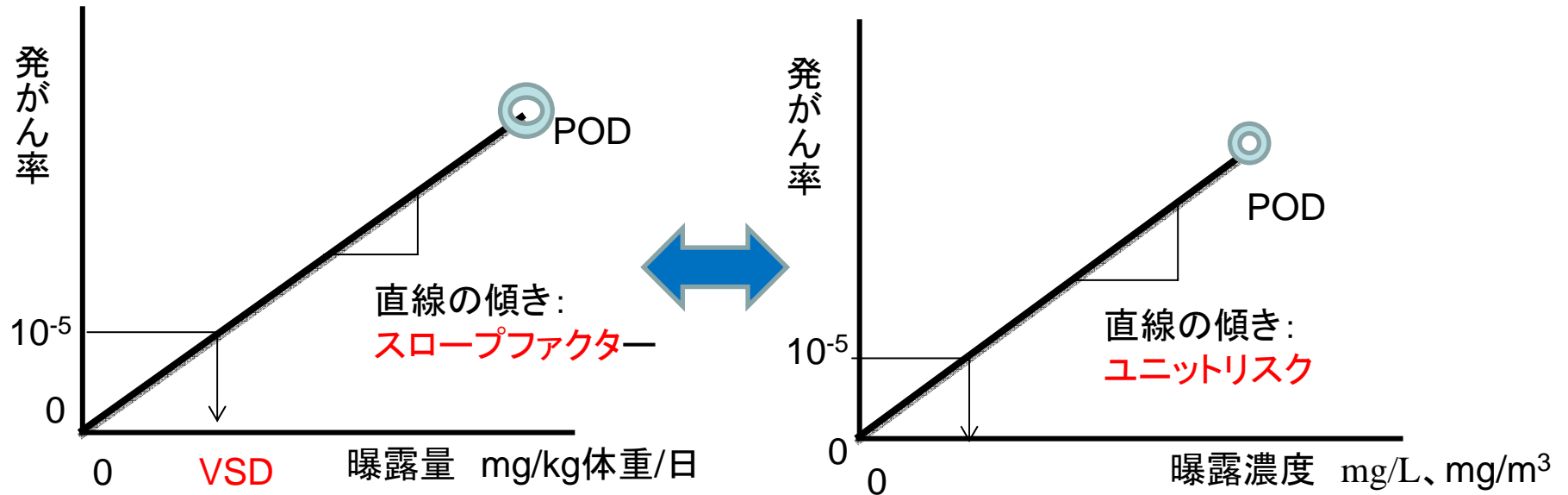
= 0.85 pg-TEQ/kg/日 / 4 pg-TEQ/kg/日

= 0.21

# 閾値のない化学物質の リスク評価

- 発がん性の確認（疫学調査や動物実験より）
- 用量－反応量（発がん率）との関係（高暴露域から低暴露域への外挿。直線の傾きスロープファクターを求める）
- 暴露評価
- リスクの判定（スロープファクターと暴露量から発がんリスクを求めて、判定）





### 曝露量と曝露濃度との関係

大気経由の曝露量 (mg/kg体重/日)

$$= \text{大気濃度 (mg/m}^3\text{)} \times \text{呼吸量 (15 m}^3\text{/日)} / \text{体重 (50kg体重)}$$

飲料水経由の曝露量 (mg/kg体重/日)

$$= \text{飲料水濃度 (mg/L)} \times \text{飲料水量 (2L/日)} / \text{体重 (50kg体重)}$$

発がん率10<sup>-5</sup>に相当する曝露量: 実質安全用量VSD (Virtually Safe Dose)

# 発ガンリスクの判定

発ガンリスク(生涯発ガン率)

$$= \text{暴露量}[\text{mg}/\text{kg}\text{体重}/\text{日}] \times \text{スロープファクター} \\ [\text{mg}/\text{kg}\text{体重}/\text{日}]^{-1}$$

$$= \text{暴露濃度}[\text{mg}/\text{L} \text{ あるいは } \text{mg}/\text{m}^3] \times \text{ユニットリ} \\ \text{スク}[\text{mg}/\text{L} \text{ あるいは } \text{mg}/\text{m}^3]^{-1}$$

発がんリスク  $> 10^{-5}$  → 何らかの対策(発生原因などを含めて)を講じる。

日本の例: 1億2千万人、寿命80年とすると、  
 $10^{-5}$ に相当するのは、15人/年

発がんリスク  $< 10^{-6}$  → リスクは小さい。

# ベンゼンの発がんリスク

- ベンゼンの大気への排出量は、年間約1万トン
- 各種自動車からの排出は、約80%を占める
- 喫煙から年間62トン排出(297  $\mu$ g/本)
- 急性骨髄性白血病(労働者の疫学調査から)
- IRIS(Integrated Risk Information System)

疫学調査結果を線形モデルを用いて低用量まで外挿

経口経由のスロープファクター

$$1.5 \sim 5.5 \times 10^{-2} \text{ (mg/kg体重/日)}^{-1}$$

大気ユニットリスク

$$2.2 \sim 7.8 \times 10^{-6} \text{ (}\mu\text{g/m}^3\text{)}^{-1}$$

飲料水ユニットリスク

$$4.4 \times 10^{-7} \sim 1.6 \times 10^{-6} \text{ (}\mu\text{g/L)}^{-1}$$



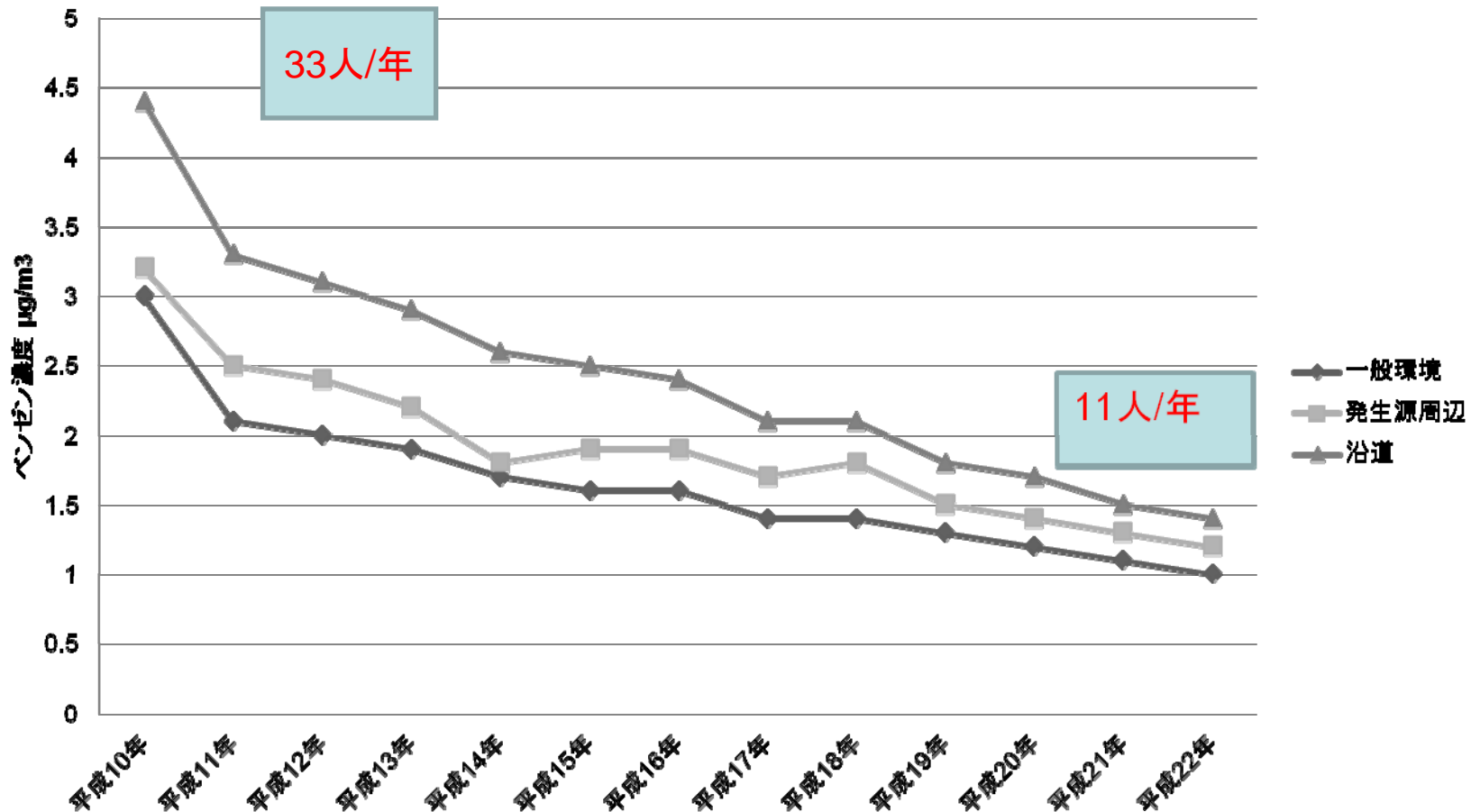
# 大気由来のベンゼンのリスク

$$= \text{ユニットリスク} \times \text{大気中のベンゼン濃度}$$

大気ユニットリスク  $2.2 \sim 7.8 \times 10^{-6} (\mu\text{g}/\text{m}^3)^{-1}$

環境基準  $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (平成9年)

## 大気中のベンゼン濃度の経年変化



# リスク管理

- ゼロリスク管理：デラニー条項（1958年）
- 無視できるリスク、我慢できるリスク、許容できるリスク、耐容可能なリスク：実質安全用量VSD  $10^{-5}$ レベル
- 便益の大きさとリスク削減に伴う費用との比較：費用効果分析 あるいは リスク削減費用と削減リスクとの比：リスク便益分析
- 予防原則
- リスクの比較：リスクトレードオフ、損失余命

# 予防原則 アジェンダ21 第15原則

## 環境と開発に関する国際連合会議(1992年)

- 環境を保護するためには、**予防的な取組方法**が各国の能力に応じてそれぞれの国で広く適用されなければならない。深刻な、あるいは不可逆的な被害のおそれがある場合には、完全な科学的確実性の欠如が、環境悪化を防止するための費用対効果の大きな対策を延期する理由として使われてはならない。

In order to protect the environment, the **precautionary approach** shall be widely applied by States according to their capabilities. Where there are threats of serious or irreversible damage, lack of full scientific certainty shall not be used as a reason for postponing cost-effective measures to prevent environmental degradation.

# 蛍光灯安定器など身近に存在するPCBに どう対処するか(1999)

## 使用・保管するリスク vs. 処理するリスク

- 行方不明となったPCBは、その当時問題となった焼却施設からのダイオキシン排出量に相当
- 外見上、問題ない安定器からPCBが漏出
- PCBの環境基準を遵守が可能ではるかに排出量が低い

# ガソリン中のベンゼンのリスク管理： 費用効果解析（内山、1994）

- リスク評価結果：大気中のガソリン由来のベンゼンを生涯吸入することで、年間86人が白血病を発症する
- 白血病による年間医療費：470~1030百万円
- 白血病罹患費用（入院期間中の所得の損失）：159~226百万円
- 白血病の死亡費用（死亡による生命の財産的価値の喪失）：2150百万円
- 平均合計：約31億円
- 86人/年の発がん＝死亡 vs. 31億円/年の投資

# 水道のリスク 感染症 vs. 消毒副生成物発がん（中西ら、2004）

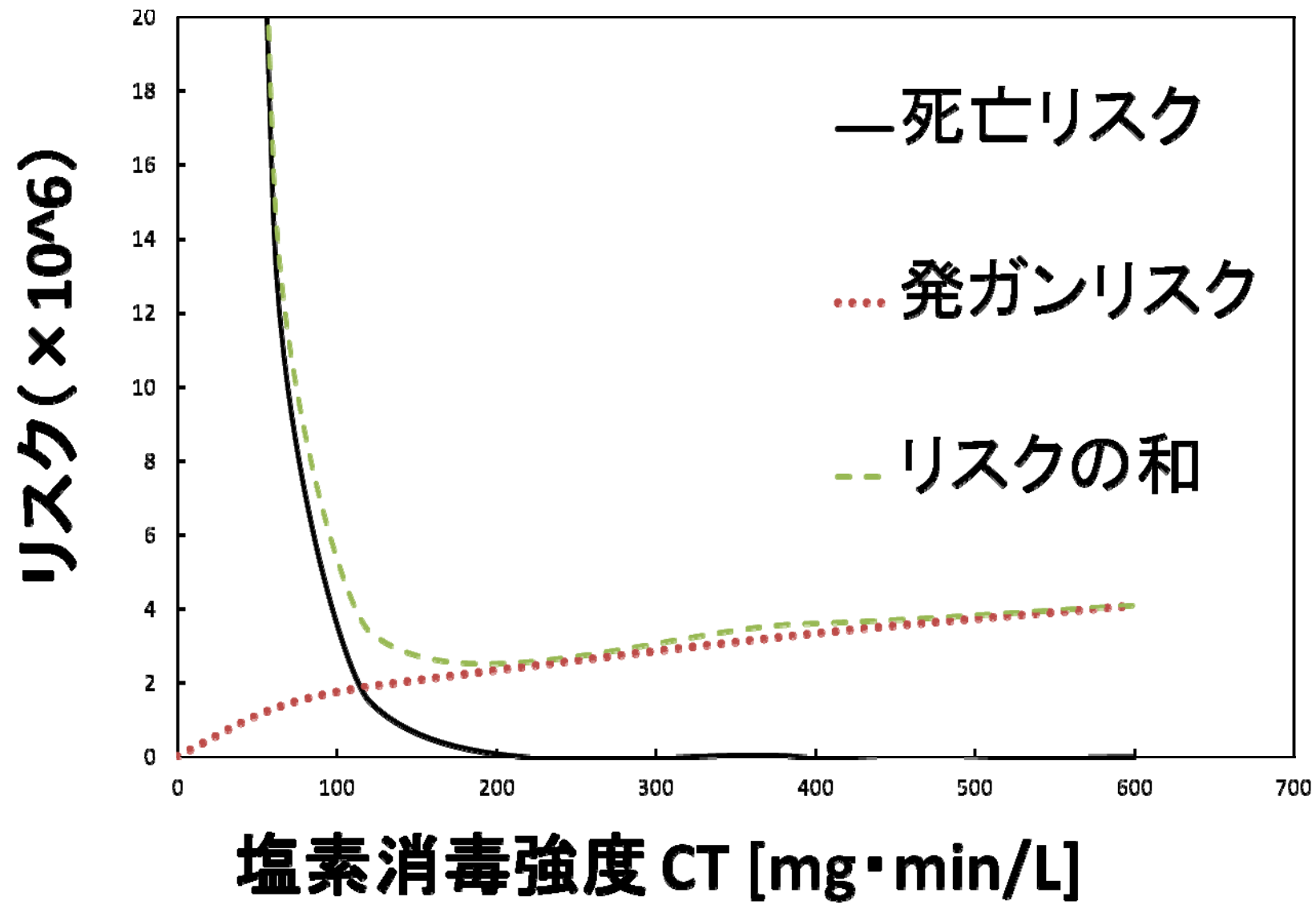
- 病原細菌やウイルス、原虫による感染症のリスクを低減
- 水道水の浄水処理過程では、塩素消毒処理が重要なプロセス
- 一方で、塩素消毒により多くの発がん性物質が生成

# 消毒副生成物

基準項目：クロロホルム、ブロモジクロロメタン、ジ  
ブロモクロロメタン、ブロモホルム、総トリハロメ  
ンタン

監視項目：ホルムアルデヒド、ジクロロ酢酸、トリク  
ロロ酢酸、ジクロロアセトニトリル、抱水クロラー  
ル

多くの消毒副生成物は発がん性の疑いある物質





# 損失余命による 化学物質のリスクランキング

- 本来なら全うした寿命を化学物質によってどれくらい短くなったのか：生命表をもとに**損失余命**(蒲生・中西らが1995年から提唱)を計算
- 発がん性物質と非発がん性物質との比較が可能
- 実質安全作用量VSD発がん率 $10^{-5}$ は、約1時間の損失余命に相当
- 喫煙(肺がん)370日、ディーゼル粒子14日、ラドン9.9日、ホルムアルデヒド4.1日、ダイオキシン類1.3日、カドミウム0.87日、ヒ素0.62日、トルエン0.31日、ベンゼン0.16日、メチル水銀0.12日、クロルデン0.009日など

	10万人当たりの年間死亡者概数(人)		我が国における年間死亡者概数(人)
ガン	250	→	300,000
自殺	24	→	28,800
交通事故	9	→	10,800
火事	1.7	→	2,040
自然災害	0.1	→	120
VSD	0.0125	→	15
落雷	0.002	→	2

中谷内一也(2006)より作成

# ホルムアルデヒド

- 鼻腔における扁平上皮がん
- ユニットリスク:  $1.3 \times 10^{-5}$  ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (EPA IRIS 1991)
- 大気中の化学物質(ベンゼン、トリクロロエチレン、テトラクロロエチレン、ジクロロメタン、ホルムアルデヒド)の暴露による発がんリスクにおいて、ホルムアルデヒドが最も大きい
- たばこ 447  $\mu\text{g}$ /本から 喫煙94トン/年
- 自動車 6800トン/年
- 化学工業などから 385トン/年
- 室内空気の濃度指針値: 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (8 ppm)

	10万人当たりの年間死亡者概数(人)		我が国における年間死亡者概数(人)
ガン	250	→	300,000
自殺	24	→	28,800
交通事故	9	→	10,800
火事	1.7	→	2,040
ホルムアルデヒド			1,950
自然災害	0.1	→	120
VSD	0.0125	→	15
落雷	0.002	→	2

中谷内一也(2006)より作成

# 室内空気中のホルムアルデヒドの リスク評価

- 汚染源： 建材、接着剤、水道水など
- 室内空気濃度 $C$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、室内体積 $V$   $\text{m}^3$ 、建材などからの放出速度 $R$   $\mu\text{g}/\text{m}^2/\text{時}$ 、建材の面積 $A$   $\text{m}^2$ 、室内換気率 $Q$  1/時
- 定常状態では、換気に伴う減少＝放出量
- $A \cdot R = C \cdot V \cdot Q$

# ホルムアルデヒドのリスク管理

- 対策コストと便益との比較
- 屋内ホルムアルデヒド濃度の低減方法：換気、建材の交換、空気清浄機による吸着、など
- 特に換気が効果的、しかし、エネルギー損失（冷暖房費の増大、高断熱高気密）
- 発がんによる死亡回避の便益の評価
- バランスを考える

土壤汚染による環境リスクとは、

土壤中の化学物質が様々な曝露経路を通じて人の健康および生活環境、生態系に悪影響を及ぼすおそれ(可能性)

$$\begin{array}{l} \text{ハザード} \\ \text{(有害性)} \end{array} \times \begin{array}{l} \text{曝露} \\ \text{(呼吸、摂食、皮膚接触など)} \\ \text{吸入、経口、経皮暴露} \end{array} = \text{環境リスク}$$

# 土壤汚染対策法で対象となるリスク： 人の健康影響に及ぼすリスク

- ①汚染土壌から溶出した特定有害物質による  
汚染地下水の摂取によるリスク
- ②特定有害物質が含まれる汚染土壌を直接摂取  
することによるリスク

## 特定有害物質

- 第一種特定有害物質（揮発性有機化合物）
- 第二種特定有害物質（重金属等）
- 第三種特定有害物質（PCB及び農薬）



## 指定基準： 土壌溶出量基準と土壌含有量基準

- **土壌溶出量基準**：土壌gの10倍量の水で6時間振とう溶出させたときの検液中の特定有害物質濃度「環境省告示18号」：土壌環境基準と同じ
  - **土壌含有量基準**：土壌gに対し、重量体積比が3%となるように1N 塩酸溶液量mlを加え、2時間振とう溶出させたときの検液中の有害特定物質を土壌1kg当たりで求める「環境省告示19号」
- 人が直接摂取する可能性のある表層土壌に高濃度に蓄積される物質：重金属等9物質

# 土壌汚染対策法の措置 リスクベース

## ①地下水等の摂取によるリスク対策措置

地下水汚染が発生しているか

土壌溶出量が第二溶出量基準に適合しているかどうか

(1) 地下水汚染なし → 地下水モニタリング (暴露管理)

(2) 地下水汚染あり かつ 第二溶出量に適合

→ 原位置封じ込め (暴露経路遮断)

(3) 地下水汚染あり かつ 第二溶出量に不適合

→ 遮断工封じ込め (暴露経路遮断)

→ 土壌汚染除去 (土壌浄化)

# 土壤汚染対策法の措置 リスクベース

## ②直接摂取によるリスク対策措置

- 暴露管理：立入禁止
- 暴露経路遮断：盛土、舗装、土壌入換え
- 土壌浄化：土壌汚染の除去

# リスクの受容性

- Medical Risk: X線撮影に伴う獲得余命と損失余命
- 便益とリスクとの比較: 選択、制御可能な場合
- Environmental Risk = Radioactive Risk = ゼロ リスクに近い

土壌汚染リスクに関して、土地所有者や汚染原因者はある程度制御可能、しかし、周辺住民は制御不可能

# 土壌・地下水汚染によるリスク

## <健康リスク>

- 地下水飲用による近隣住民の健康被害
- 工場従業員の健康被害(胆管がんなど)

## <企業におけるリスク>

- 土地所有者として調査対策の実施
- 汚染原因者として汚染除去、拡散防止対策の実施
- 周辺住民が被った健康被害、財産被害(地価下落)、風評被害への賠償責任
- 土地利用上の制約
- 土地価値下落による資産評価の低下
- 企業イメージの低下

# 企業責任とリスク管理

- Environmental Stewardship Plan  
(monitoring, responsible care, etc.)
- Pro-active attitude
- Municipalities, local government supports
- Communications