

## 4. 記念講演

### 環境化学の歩みと環境計測の今後の課題

森田 昌敏（国連大学顧問・国立環境研究所特別客員研究員）



環境化学は、環境での物質変化を追求する学問である。その理解のために環境計測技術が発達し、また人や生物への影響を含む環境変化を捉える学問が発達してきた。特に、環境汚染は公害という社会的な事象として問題となりつつ、やがて地球環境や自然の保全という幅広いスコープのもとで環境の重要性が社会の中にもめこまれつつある。

#### I. 環境汚染問題とその対策のトレンド

1971年の国会は公害国会と呼ばれ、高度成長を支えた重化学工業発展に伴う、環境汚染からの人の健康救済を軸に、各種の環境関連法案が成立した年である。ここでは様々な環境汚染物質が問題となり、大気汚染、水質汚濁、悪臭、騒音、振動などの公害があるが、有害物質の悪影響は大きく、公害病とされる水俣病、イタイイタイ病、土呂久ヒ素汚染、四日市ゼンソク等についての救済も重要な課題であった。それらの事象の現象解明や影響の解明に、環境化学の果たした役割は大きい。

過去の代表的な研究例をいくつか挙げると、①水銀、鉛、ヒ素等の有害な重金属類の環

境動態の解明が進み、また生物や食物への移行が明らかとされたこと ②PCB、DDT、有機スズ等の有機汚染物質の生物濃縮が明らかとされたこと ③大気中の有害ガスの動態が明らかとされ、また光化学スモッグのメカニズムが解明されたこと ④N、P を始めとする栄養塩類の動態が明らかとされ、富栄養化のメカニズムが明らかとなってきたこと ⑤環境発ガンのメカニズムについても少しずつ研究が進み、対策が可能となってきたこと ⑥超微粒子物質—例えばダイオキシンの分析が可能となり、リスク評価に進んできたこと、等が挙げられる。

また一方で、フロンによる成層圏オゾン層の破壊現象や、二酸化炭素を始めとする温暖化ガスの推移の解明のように、地球規模の汚染課題にも研究の展開が図られた。

環境に関わるいろいろな法律における規制項目の変化と規制のアプローチをみてみると興味深い。規制の項目であるが、これは単純に増加の一途をたどっている。また規制の項目に強弱がつけられ、よりきめ細かく、別の表現では複雑になってきている。また規制の仕方もより細かくなっており、従来からの Yes/No 型の規制から、より柔軟なアプローチを組み込んだものとなってきている。これは、有害物質の危険性が単にその毒性依存するだけでなく、人との接触機会に左右されること、従って、曝露機会を減少させる仕組みを取り込むことが重要となってきていることに対応しよう。また事件や事故を受けての規制から、未然防止型にむかいつつある。この線上に、欧州の Rohs や Reach がある。

環境規制関係では、大気汚染防止法での大気中の微粒子や指針値の示されていない重点項目への取組が、また水質汚染防止法では、水生生物対応を含めて、項目の見直しと追加が課題となってきつつある。

最近における環境対策の必要とされるいくつかの例を示すと次のようになる。

#### 1. 地球温暖化対策と資源エネルギー問題

- ・バイオマスエネルギーの利用とそれに伴う環境負荷
- ・水素エネルギー利用とそれに伴う環境負荷
- ・DME の利用拡大、石炭液化の再興
- ・再資源化の増加に伴う有害物質の発生
- ・原発の廃炉問題

#### 2. 古くて新しい汚染

- ・DIOXIN とその仲間
- ・PCB とヒドロキシ PCB
- ・POP s 対策 (有機塩素系農薬、HCB など)
- ・農薬 食品中残留農薬のポジティブリスト化
- ・重金属対策 Hg、Cd、Pb、As、Se、・・・その他
- ・発ガン性物質 PAH、ニトロソアミン、・・・等

#### 3. 新たな化学物質汚染

- ・環境ホルモン問題
- ・有機臭素、有機フッ素、有機金属化合物
- ・ナノテク材料、ナノ粒子
- ・レアメタルの利用拡大
- ・Biocide の非農薬的使用

#### 4. 都市の環境問題 (特に移動発生源)

- ・ディーゼルガス中の有害汚染物質
- ・燃料や添加物の問題、エタノール添加 オクタン価向上剤、水抜き剤 等々
- ・車内室内汚染の問題 フタル酸エステル、難燃剤など
- ・ブレーキパッド アスベスト代替物質の問題

- ・バッテリー 新材料の環境インパクト

## 5. 生態系保全に向けた有害化学物質対策の強化

- ・新たな環境基準や排水基準の設定及び排水基準 (2ppm)
- ・農薬の生態リスク評価 環境予測度とは別に、環境実測濃度が必要
- ・医薬品、動物医薬品の環境リスク 環境データの集積が必要

## 6. 土壌の地下水汚染対策

- ・大きな汚染の貯留

## II. 環境計測の展開

環境計測の発展の方向は具体的に次のように例示することができる。

①高感度化 ②高精度化 ③非破壊計測 ④遠隔計測 ⑤自動化、簡易化、フィールド分析、⑥局所分析、表面分析 ⑦キャラクタリゼーション ⑧イメージング ⑨情報との結合などを挙げることが出来る。

特に環境中の汚染物質の分析法としては、それらを効率よく分析するためには、高感度な多成分同時計測法の発達がかかせない。

以下に今後の発展を示すいくつかの例を示す。

**有機微量汚染物質の分析**は、ガスクロマトグラフや液体クロマトグラフにより発展し、ガスクロマトグラフ質量分析法 (GC/MS) と液体クロマトグラフ質量分析法 (LC/MS) によって多数の物質の測定が可能になった。

また MS/MS 法により、選択性が高まり、感度の向上と相まって成熟しつつある。ダイオキシンの超微量分析と共に発展した高分解能 MS の利用は、今後他の物質の分析に応用の途を見つけていくであろう。LC/MS の応用は、揮発性の低い物質に必須の機器であり農薬分析を中心としてこれからも広がっていく。

**重金属等の元素の分析**は、ICP/MS 法の発展により、高感度の多元素同時分析については分析装置発展は達成されてきている。また同位体情報が得られ、環境動態の解明に応用されることも多くなっている。実分析においてむしろ問題の前処理のところであり、自動化を含めこの分野での発展が必要となっている。

**現場分析法**は、ラボに持ち込んで測定する従来型の分析とは異なり、フィールド分析のニーズは高まっている。今後発展している情報通信技術と相まって、広範囲に利用されることになるであろう。典型的な例として土壌汚染があるが、現場分析型の蛍光 X 線分析や GC (GC/MS) の利用が広がりつつある。

**リモートセンシング技術**は、着実な進歩をみせている。測定項目としては従来物理的な量 (温度、形) などが多かったが、現在は化学量もかなり測定されるようになり、環境モニタリングに応用されてきている。例えば湖水や海水中のクロロフィル量は、衛星から測定されているし、また大気圏の中のガス成分については陸上あるいは飛行機からのリモートセンシングによりモニタリングがなされてきている。発生源を直接監視するアプローチもありうる。

**情報技術との結合**は、計測の基礎となる分光技術のハードウェアの発展とは裏表の関係で最近 20 年間に発達してきたものである。今後の発達は、そのような計測手段だけではなく、計測値に付加価値を与えるためにも重要となつてこよう。例えば環境計測値を地理情報の上のせることは既に試みられているが、衛星通信を介したリアルタイムモニタリングを更に結び付けることも行われよう。また可視化の手法により、その生物学的な計測値の意味を総合的に理解する情報の集積と活用も高められよう。

**生物検定法**は、人間の環境破壊の一局面は、有害な汚染物質による生物への悪影響であろう。このような影響の検出には、生物的 (或いは生化学的) 検定法を利用することが必

要である。in vivo 或いは in vitro の生物検定法の利用が拡大してきている。生物検定法の公定法化は、労働省のエームズテストに始まり、人を用いる例では悪臭の臭覚試験法がある。最近ではダイオキシンへの活用が認められている。生物検定法は化学量の測定だけではなく、生物活性用測定に用いられる。今後、病理学的や機能レベルで観察する影響評価法に対し、DNA チップやプロテインチップを用いた新たなアプローチが、予防原則という新しい理念と共に今後拡大していくと思われる。

**分析精度管理**は、分析の広がりにも関わらず、技術力の高い分析技術者の不足が課題となっている。このため、分析精度の管理の重要性がますます増大してきている。分析機関の認証、分析者の教育、外部精度管理、標準物質、GLP 等、関連する項目でのそれぞれの充実が必要である。中でも、質の高い分析技術者の確保は重要であり、その意味で日環協の分析技術者の認定は意味深い。

### Ⅲ. 化学物質のリスクとリスク管理

多くの有害化学物質の規制は、明白な中毒事件の原因となったことを起点としている。そこにおける有害性の評価の正当性は、中毒事件被害者の存在によって裏打ちされている。しかしながら、有害化学物質の中毒は中毒量を摂取した人に発生したものであり、規制基準を決定する定量的な論議において十分な情報が存在した訳では必ずしもないことに留意しておく必要がある。

多量の化学物質を浴びた人は死亡又は重篤な症状を示す。それよりも数多い人々は軽度の症状を示すが、回復する。更により多くの人々は生理的な変化、生化学的なパラメータで変化示すが、臨床的症状を特段示すことなく回復する。さて、症状の軽いもの及び、明確な（或は典型的な）症状を示さないグループはしばしば中毒患者として認定されない。また事件当時軽度の症状で回復と見なされたものが、後になって後遺症を示すことがある。一般的に疫学的に中毒量を決定することは容易ではなく、また、無影響と軽度の影響は群の差として統計学的に検知し得たとして、個々人の間で判定することは困難を伴う。即ち、中毒のケースからリスクの評価を考える時において、尚、グレーゾーンが存在すること、しばしば科学的につめきらず政治的に決着せざるを得ないことがある。

一方で中毒被害の未然防止の観点から規制を発動しようとするとき、その発動の根拠とすべき有害性の証拠はどのように存在し、或いは得られるべきものであろうか？ここにリスク評価というアプローチが出現する。本アプローチは有害性の程度を数値化することに、絶対的又は相対的比較を可能としようとするものである。発ガン物質については、クライテリアとなる耐用量としては、生涯発ガン性リスクとして  $10^{-5}$  が採用されることが多い。高投与量で得られた発ガン発生率をゼロ投与量まで線で結合する仕方にはいろいろな提案があり、その良否についての議論は可能であるが実験的な実証はほぼ不可能である。

有害物質による生態系への悪影響という概念は、従来はヒトの健康保護よりもプライオリティーが低いと考えられ、生産活動や開発の陰で生態系が犠牲となってきたことは事実である。近年にいたるまで多くの生物種が絶滅し、また危機にひんして来ている。保護のためのアプローチが求められてきており、その原因の一部として化学物質対策も考えられるべき時といえる。多量生産・使用される界面活性剤や工業化学品、農薬とその不純物、家庭等に広がる各種抗菌剤の使用等、化学物質の使用が広がる中で野生生物の保護は欧米諸国において一つのドレンドとなりつつあるが、我国においても、その対応が急がれる。

内分泌攪乱化学物質の問題は人と野生生物の未来の問題である。人において提起されている問題の中でも重要な点は、生殖、免疫及び脳発達に対する悪影響である。若年層の減少及び知的水準の低下が、もし真に進行しているとすれば、国力の低下に直結することは間違いないであろう。米国における環境ホルモン問題の主たるターゲットは生殖よりも脳

発達にある。米国の特殊出生率はほぼ2であるが、我国は1.3に低下しており、生殖への影響が危惧される。生殖能力の低下と関連して、若年層（20歳代の若い男性）の精子数の低下、運動率の低下等が指摘された。またある種の化学物質が職業病として精子減少を引き起こしたことなどから化学物質の寄与が疑われる状況にはある。しかしながら、一般人口集団において、単一化学物質のこの種の悪影響との因果関係の解明はおそらく不可能で、むしろ“疑わしきは近寄らず”のような知恵によって解決されていくのかも知れない。

人や野生生物にみられる悪影響と化学物質との因果関係を証明することは困難な、ある場合はほとんど不可能な仕事である。二つの例を挙げる。一つは水俣病を考えてみる。メチル水銀の多量摂取により、死亡したり典型的な神経症状を示す患者さん達が発生し、これらの方々については因果関係は明確として水俣病の認定を受けている。しかしおそらくより少量のメチル水銀を摂取したであろう人は、典型的な症状を示さず、或は不顕性の状態にあり、水俣病であるか否かの判定基準を満たさない為に未認定患者としての評価を受ける。これらの未認定患者のひとりひとりについて、メチル水銀の影響を受けたかどうかを明確に証明する手立ては容易には見出せない。

もう一つの例としてアスベストに起因する肺ガンを考えることができる。肺ガンはいろいろな原因によって発生するため、アスベストの吸う機会が多かった肺ガンになったとして、この人のガンがアスベストに起因すると証明することは困難である。中皮腫はアスベストによって発生するガンであるが、アスベスト以外の原因もありうると考えられる。中皮腫の患者さんをアスベスト公害として救済するのは、従って、科学的な因果関係に基づいてというよりも政策的なオプションであるということができる。

最後に最近、話題となっている物質の例を1、2挙げると次のようなものがある。フタル酸エステル（環境ホルモンとして）、臭素化塩素化ビフェニル（摂南大 太田ら）、フッ素系化合物（PFOS等）、これらについて早急なリスクアセスメントが必要である。

## 環境化学とは

●環境における物質の存在量、存在形態、化学的及び生物化学的変化と循環を明らかにすると共に、それらの物質の環境影響の解明及び悪影響を防止するための物質科学的アプローチ

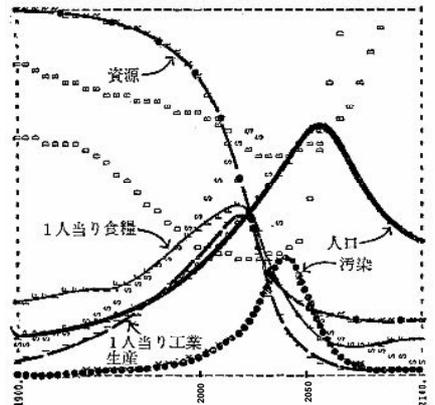
●地球科学、生命科学などのまたがる総合科学の色彩を帯びていると共に、環境の状態を記述するための計測技術の重要性

## 環境化学の主要な成果の例

1. 環境汚染の解明と公害の防止
  - ・水俣病、イタイイタイ病などの重金属汚染による公害病対策
  - ・大気汚染、光化学スモッグ
  - ・水質汚染、富栄養化
  - ・有害有機汚染物質、ダイオキシン、PCB等の対策
2. 物質循環の解明と地球規模の環境問題
  - ・炭素循環と地球温暖化
  - ・フロンと成層圏オゾン消失
  - ・POPs対策
3. 生命学への貢献
  - ・ガン対策
  - ・次世代への悪影響の防止

## 成長の限界—進行と対応

### ローマクラブ予測



1. 人口増加は予測通り移行
  - ・食糧生産は順調、危機は当面なし
  - ・資源の限界は、約20年ほど遅れている。
  - ・環境汚染は開発途上国で拡大
2. 日本としては、人口再生産の低下及び2050年頃の資源枯渇への対応及び環境汚染対策が必要
3. 人類人口の激減の原因として、戦争やテロの可能性が増大

## 有害化学物質関連の法律とその特性

法律名	所轄官庁	特質
劇毒物	厚労省	流通段階でのコントロール
労働安全衛生法	厚労省	労働環境。主として吸入曝露
食品衛生法	厚労省	食品中の労働有害物質規制
水道法	厚労省	水道中の有害物質規制
農薬取締法	農水省/環境省	農薬の安全性、生態系を含む
化学物質審査規正法	経産省/環境省/厚労省	一般化学物質製造・流通規制
化学兵器法	経産省	化学兵器及びその原料の規制
水質汚濁防止法	環境省	公共用水域の保全、地下水を含む
大気汚染防止法	環境省	大気質の保全
廃棄物清掃法	環境省	廃棄物の管理
土壌汚染対策法	環境省	土壌汚染の防止の修復
ダイオキシン特別措置法	環境省	ダイオキシン対策
PCB対策法	環境省	PCB処理
PRTR法	環境省/経産省	化学物質の登録

## 1970年前半 第一次有害化学物質問題ブーム

レイチェル・カーソン *Silent Spring*  
 有吉佐和子 複合汚染      宇井 純 「公害原論」

顕在化  
問題

「公害国会(1970) 水濁法、大防法、廃掃法等 環境諸法の改正  
 ← 化審法制定、農取法改正、他

潜在的  
問題

### 先送りされた課題

- ① 化学物質の微量曝露の健康影響
  - A. 発ガン性物質(長期曝露の影響)
  - B. 次世代への影響(高感受性のグループ)
  - C. 免疫への影響(過敏化)
  - D. 複合汚染
- ② 化学物質の生態影響

## 1990年代から2000年初 第二次有害化学物質問題ブーム

Our Stolen Future ダイオキシン、環境ホルモン問題  
 環境と食の安全

顕在化  
問題

水、空気の安全 水道法、水濁法改正(1993)、大防改正(1996)、  
 ダイオキシン特措法(1997)、PCB対策法(2001)、  
 土壌対策法(2002)、PRTR法(2000)、  
 化審法改正(2003予定)  
 食の安全 農取法改正(2002)

潜在的  
問題

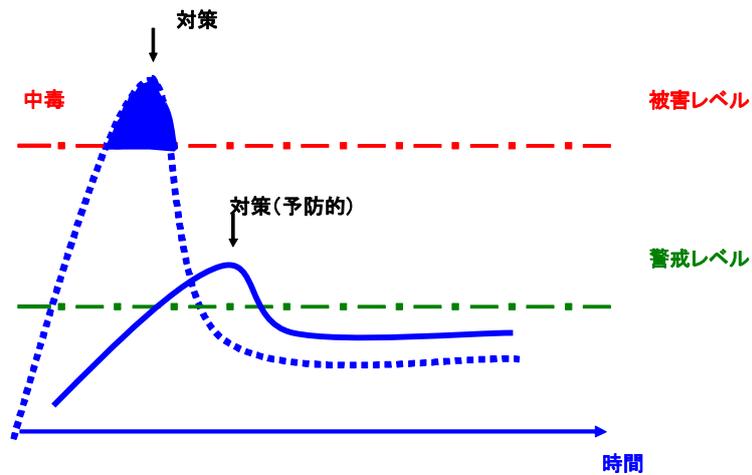
### 今後に残されている課題

- ① 子供の健康(胎児を含む)、脳の発達
- ② 複合汚染効果 総合的な評価
- ③ 新たな疾病との関わり(化学物質過敏症を含む)

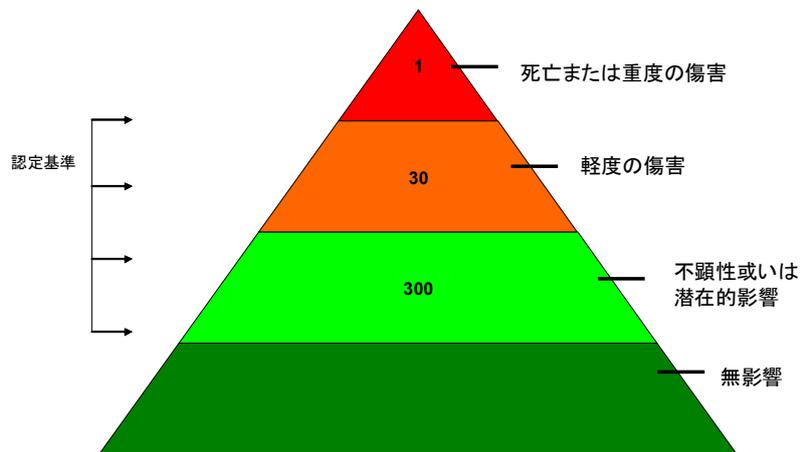
## 化学物質の発生源と種類の数

- 化学産業や実験室で作られる合成化学物質
  - 天然化学物質
  - 非意図的生成化学物質(自動車、ゴミ焼却など)  
 (毎年150万種ずつ増加中)
- } 合計2470万種類
- 商業的に利用されている化学物質の数 約10万種類  
 (新規化学物質登録数増加 1500種/年)
  - 法的規制下にある物質数
    - 劇毒法 約1500種
    - 水質汚濁防止法 46項目/(300種 要調査項目)
    - 大気汚染防止法 22項目/(243種 優先取組物質)
    - 労働安全衛生法 約300種
    - 農薬取締法 約200種
    - 食の安全関連の農薬 約1000種

## 有害化学物質の問題—時間経過



## 有害化学物質—影響の分布(ハインリッヒの法則)



## 有害化学物質と緊急時対応

### 有害化学物質の事故

- ・ 化学タンクの爆発
- ・ 工場火災
- ・ 船舶事故
- ・ 化学ローリー輸送事故
- ・ 例 (インドポパール農業工場)  
(タンカー事故)

### テロと戦争

- ・ 自然災害 (地震・台風)
- ・ 例 兵庫県南部地震
- ・ 環境兵器
- ・ 化学兵器テロ
- ・ 例 地下鉄サリン

## I. 地球温暖化対策と

### 資源エネルギー問題

- ・ バイオマスエネルギーの利用とそれに伴う環境負荷
- ・ 水素エネルギー利用とそれに伴う環境負荷
- ・ DMEの利用拡大、石炭液化の再興
- ・ 再資源化の増加に伴う有害物質の発生
- ・ 原発の廃炉問題

## 有害化学物質と緊急時対応

### 有害化学物質の事故

- ・ 化学タンクの爆発
- ・ 工場火災
- ・ 船舶事故
- ・ 化学ローリー輸送事故

・ 例  
(インドボパール農業工場)  
(タンカー事故)

- ・ 自然災害  
(地震・台風)
- ・ 例 兵庫県南部地震

### テロと戦争

- ・ 環境兵器
- ・ 化学兵器テロ
- ・ 例 地下鉄サリン

## II. 古くて新しい汚染

- ・ DIOXINとその仲間
- ・ PCBとヒドロキシPCB
- ・ POPs 対策 (有機塩素系農薬、HCBなど)
- ・ 農薬  
⇒食品中残留農薬のポジティブリスト化
- ・ 重金属対策  
⇒Hg、Cd、Pb、As、Se、・・・その他
- ・ 発ガン性物質  
⇒PAH、ニトロソアミン、・・・等

### III. 新たな化学物質汚染

- 環境ホルモン問題
- 有機臭素、有機フッ素、  
有機金属化合物
- ナノテク材料、ナノ粒子
- レアメタルの利用拡大
- Biocideの非農薬的使用

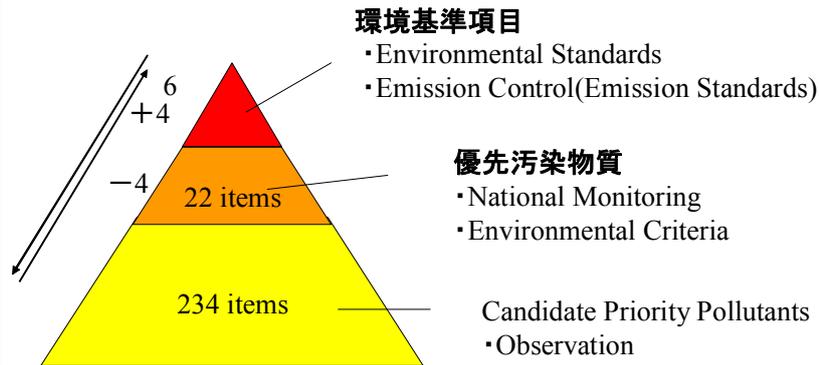
### IV. 車の環境問題

- ディーゼルガス中の有害汚染物質
- 燃料や非添加物の問題  
エタノール添加から何が？  
⇒オクタン価向上剤、水抜き剤 等々
- 車内室内汚染の問題  
⇒フタル酸エステル、難燃剤など
- ブレーキパッド  
⇒アスベスト代替物質の問題
- バッテリー  
⇒新材料の環境インパクト

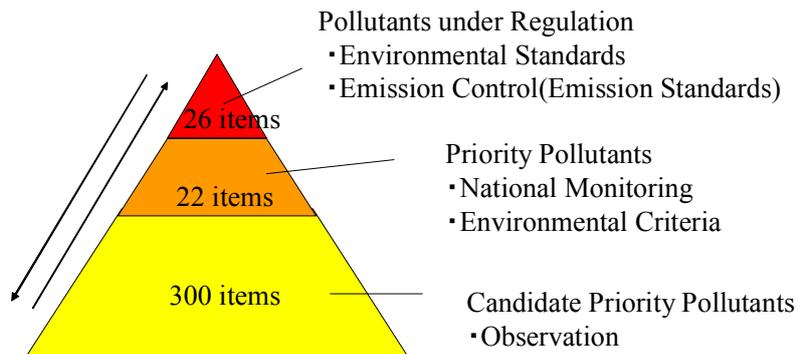
### V. 生態系保全に向けた有害化学物質対策の強化

- 新たな環境基準や排水基準の設定及び  
排水基準(2ppm)
- 農薬の生態リスク評価  
⇒環境予測度とは別に、環境実測濃度  
が必要
- 医薬品、動物医薬品の環境リスク  
⇒環境データの集積が必要

## 有害大気汚染物質の規制と調査



## 水質汚染物質 — 健康項目



## 土壌環境基準

### ●地下水質保全

- 26 items
- 溶出試験・環境基準をクリアーすること

### ●直接摂食

- 土壌有効含有量(Pb,Cd,Hg,Cr,As,Se,F,B,CN,PCDD/DF)  
1M HCl Dissolution(重金属)

### ●農用地基準

- Three Items(Cd,Cu,As)

## 複合効果 — 環境化学物質問題の 最大の課題の一つ

1. 化学物質は製造、消費を経て、最終的に環境に入る。
2. 例えば河川水には、農業地域から農薬が、工場から各種の化学物質が、下水処理工場から人からの排泄物と家庭で用いられる各種化学物質が含まれてくる。大気も、食品も多くの規制値以下の汚染物質を含み、結果として人はそれらを体内に取り込んでいる。
3. 個々の化学物質が許容されるレベルであっても、全体として安全性が確保されているのであろうか？生活者の視点からの評価が必要。

## 内分泌攪乱物質の最近の話題の例

1. 難燃剤臭素化ビフェニルエーテルの体内蓄積  
甲状腺ホルモン低下
2. フッ素系化合物(PFOS,PFOA)の環境汚染と  
体内蓄積  
EPA デュポン社に200億円の罰金
3. 身近な汚染物質とその影響  
ビスフェノールA、フタル酸エステル類  
小児ぜんそくやアトピーと関係？
4. ジフェニルヒ素化合物  
神経毒性

## 拡大する分析需要

1. 環境規制の拡大
  - ・水質汚濁防止法
  - ・大気汚染防止法
2. 安全・安心に対する国民の要望
  - ・ダイオキシン、環境ホルモン、化学物質過敏症
  - ・色の安全、農業
3. グローバル化する環境汚染の問題
  - ・地球規模の汚染(大気圏、海洋)
  - ・地域レベルの汚染
  - ・黄砂、酸性雨、国際河川、閉鎖性海域(e.g. 日本海)
4. 過去の汚染の修復
  - ・PCB、POPs農薬、化学兵器
  - ・土壌底質汚染対策

## 分析精度の管理

### 1. 内部精度管理

- ・GLP(Good Laboratory Practice)
- ・標準物質、SOP、標準分析法
- ・精度管理システム
- ・教育

### 2. 外部精度管理

- ・監査
- ・ラウンドロビンテスト
- ・技術者認証
- ・機関認証

## バイオアッセイの拡大

### 1. 物質科学的計測法の限界

- ・多成分同時測定法(GC/MS、ICP/MS)

### 2. 生物化学的手法

- ・免疫測定法

### 3. In Vitro Bioassay法

- ・細胞培養、組織培養、DNAチップ、プロテインチップ

### 4. In Vivo Bioassay法