

## 6. 材料の環境情報指標の研究

篠原嘉一

(独)物質・材料研究機構研究機構 環境・エネルギー材料領域 エコエネルギーグループ

(〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1)

\* E-mail: SHINOHARA.Yoshikazu@nims.go.jp

NEODプロジェクトでは、材料の環境情報を表示するための統合的指標の研究開発を行った。指標を、1) 原材料に関連する指標、2) 製造・利用・廃棄に関連する指標、3) 安全性に関連する指標、の三つに分類した。本論文では、製造・利用・廃棄に関連する指標の一つである“材料利用による製品の環境負荷低減性”と、安全性に関する指標の一つである“環境影響物質の低減性”に関する指標について紹介する。

**Key Words :** *environmental information, index, materials and articles, world trade*

### 1. はじめに

持続可能な発展のためには、経済活動の維持と地球環境負荷の削減を両立させることが不可欠である。自由貿易下で工業製品の環境負荷を削減するためには、まず、材料・材料製品の環境情報を表示する指標を国際的に開発・整備して、入札・売買の判断材料にすることが求められる。京都会議の主催国である日本が中心となって、多様な材料に対応して環境情報を表示し得る指標と表示フレームの国際開発・標準化を推進し、持続可能な発展のための礎を構築することを目的として、材料の環境情報を表示するための統合的指標の研究開発を行った。

環境情報は、ライフサイクル思考に基づくと、資源採取、原料生産、材料製造、製品製造、製品利用、廃棄・リサイクル、そして安全性に分類される。本研究における指標も

- 1) 原材料（リサイクルを含む）に関連する指標
- 2) 製造・利用・廃棄に関連する指標
- 3) 安全性に関連する指標

の三つのグループに分けて研究を行った。

### 2. 対象とした指標

- (1) 原材料（リサイクルを含む）に関連する指標
  - (a) 原料の環境負荷低減性

この指標は「どの程度、環境負荷の小さな資源を使用した素材であるか？」を表す。具体的には、原料の環境負荷を関与物質総量、枯渇性を資源枯渇加速度で評価する。関与物質総量とは、鉱石資源や生物資源の採掘、採取、選別、原料生産および輸送に関与する物質の総重量を指す。また資源枯渇加速度とは、一定量の資源を消費することによって資源消費速度がいかに加速されるかを示し、鉄を1として相対的に表す。

#### (b) 材料のリサイクル性

この指標は「リサイクル性の高い素材であるか？」を表す。具体的には、材料メーカーの活動内容と材料のリサイクル可能性で評価する。リサイクル可能性はリサイクル使用できる回数で評価する。

#### (2) 製造・利用・廃棄に関連する指標

##### (a) 材料利用による製品の環境負荷低減性

この指標は「製品として組み込まれた時に高い生産性や優れた環境効率を発揮できる素材であるか？」を表す。具体的には材料の特性データと基礎データで評価する。特性データとは着目する機能に直接的に関係するデータで、基礎データとは間接的に関係するデータのことである。

##### (b) 材料の製造・利用・廃棄時の環境負荷低減性

この指標は「環境負荷の小さなプロセスで製造・利用・廃棄できる素材であるか？」を表す。具体的には、技術革新、排出、効率で評価する。排出は温室効果ガスの排出と、大気、水、土壌への排出で、効率は、工業用水、排出熱、最終廃棄物で構成される。

(3) 安全性に関連する指標

(a) 環境影響物質の低減性

この指標は「使用や廃棄の段階で環境影響物質の排出を抑えることができる素材であるか？」を表す。具体的には、製品製造・製品利用・廃棄時に排出される物質の量と構成元素を把握しているかどうかで評価する。

(b) 材料の環境浄化性

この指標は「環境中の有害物質を浄化させる機能をもった素材であるか？」を表す。具体的には環境浄化機能の特性データと基礎データで評価する。指標「材料利用による製品の環境負荷低減性」から環境浄化性のみを切り出した形になっている。

4章と5章において、指標「材料利用による製品の環境負荷低減性」と指標「環境影響物質の低減性」について、研究結果を詳しく紹介する。

3. 各指標の関係

一般に製品の環境効率<sub>製品</sub>は次式で与えられる。

$$\text{環境効率}_{\text{製品}} = \frac{\text{性能}_{\text{製品}}}{\text{環境負荷}_{\text{製品}}} \quad (3a)$$

製品の環境効率とは環境負荷当たりの製品性能を表し、環境効率が高い製品ほど環境影響が小さい製品とされる。ここで言う環境負荷は、ライフサイクルを通した環境負荷を示す。高い環境効率を得るためには、製品性能を高くすること、and/or ライフサイクル環境負荷を低くすることが求められる。

式(3a)は式(3b)展開できる。右辺の第一項は、製品のシステム効率、第二項は材料性能、第三項は材料製造の歩留まり、第四項は原料生産の歩留まり、第五項は資源の環境品質、第六項は製品のライフサイクル環境負荷に対する資源採取の環境負荷の割合を示す。製品の環境効率は、六つの項の積として表すことができる。

$$\text{環境効率}_{\text{製品}} = \frac{\text{性能}_{\text{製品}}}{\text{性能}_{\text{材料}}} \times \frac{\text{性能}_{\text{材料}}}{\text{材料}} \times \frac{\text{材料}}{\text{原料}} \times \frac{\text{原料}}{\text{資源}} \times \frac{\text{資源}}{\text{環境負荷}_{\text{資源}}} \times \frac{\text{環境負荷}_{\text{資源}}}{\text{環境負荷}_{\text{製品}}} \quad (3b)$$

原材料に関連する指標「原料の環境負荷低減性」は、右辺の第四項と第五項における天然資源部分に関連する。指標「材料のリサイクル性」は右辺の第四項と第五項におけるリサイクル資源部分に関連する。指標「材料の製造・利用・廃棄時の環境負荷低減性」は、右辺の第三項と、第六項の分母“環境負荷<sub>製品</sub>”の中で、材料製造、製品製造、製品利用および廃棄に関連する。

これら三つの指標に対して、指標「材料利用による製品の環境負荷低減性」および「材料の環境浄化性」は右辺の第二項“材料性能”に対応する。

指標「環境影響物質の低減性」は、材料製造、製品製造・製品利用・廃棄時における環境影響に関連する。

六つの指標は、式(3b)の右辺の第2項以降に関連しており、指標を評価することにより、その材料を用いた場合に製品の環境効率がどのように向上、または低下するかが理解できる。

4. 指標「材料利用による製品の環境負荷低減性」

(1) 概要と評価手順

この指標は、材料性能そのものを評価する指標である。対象とする材料の性能評価の手順は次の通りである。

- i) 特性データと基礎データをリストアップする。
- ii) 特性データについては、基準値(Reference value)で除することにより相対値(Ri)を算出する。
- iii) 相対値を、換算表を用いてスコア(Pi)に換算する。
- iv) 全ての特性データから得られたスコアを算術平均して、指標スコアを算出する。

(2) 具体例について

この手順について、半導体材料の一つである熱電材料を用いて説明する。熱電材料はペルチェ冷却や熱電発電に用いられる材料で、特性データとしては、性能指数(Figure-of-merit)、ゼーベック係数(Seebeck coefficient)、電気伝導率(Electrical conductivity)、熱低効率(Thermal resistivity)、曲げ強度(Bending strength)が上げられる。

BiTe系熱電材料には、原料を溶解して一方向凝固させた溶製材料(Solidified BiTe)と溶製材料を粉末にして焼き固めた焼結材料(Sintered BiTe)がある。これら二種類の材料の特性データを上記手順で評価してみる。

それぞれの熱電材料の特性データおよび基準値を纏めたものを表1に示す。溶製材料の性能指数の相対値は、 $3 \times 10^3$ を $1 \times 10^3$ で除することにより3となる。

表1 二種類のBiTe系熱電材料の特性データおよび評価結果

| Typical properties      | Ref.value          | Solidified BiTe    |     |    | Sintered BiTe        |     |    |
|-------------------------|--------------------|--------------------|-----|----|----------------------|-----|----|
|                         |                    | Value              | Ri  | Pi | Value                | Ri  | Pi |
| Figure-of-merit         | $1 \times 10^{-3}$ | $3 \times 10^{-3}$ | 3   | 6  | $3.8 \times 10^{-3}$ | 3.8 | 7  |
| Seebeck coefficient     | 100 $\mu$ V/K      | 200 $\mu$ V/K      | 2   | 4  | 200 $\mu$ V/K        | 2   | 4  |
| Electrical conductivity | 500S/cm            | 900S/cm            | 1.8 | 4  | 800S/cm              | 1.6 | 4  |
| Thermal resistivity     | 0.5Km/W            | 0.8Km/W            | 1.6 | 4  | 1.2Km/W              | 2.4 | 5  |
| Bending strength        | 100MPa             | 40MPa              | 0.4 | 1  | 100MPa               | 1   | 2  |

さらに、表2に示す換算表を用いることにより、相対値3はスコア6であることがわかる。表1には、二種類の熱電材料について、それぞれ五つの特性データのスコアも記入されている。

表1中のスコアを算術平均することにより、溶製材料の指標スコアが3.8、焼結材料の指標スコアが4.4となる。指標スコアを比較することにより、熱電材料として焼結材料が優れた材料特性を有することが分かる。

なお、熱電材料の基礎データとしては、破壊靱性、破断伸び、熱膨張係数、耐酸化性などが挙げられる。これらの基礎データも特性データおよびその評価結果と共に開示されるべきものである。

## 5. 指標「環境影響物質の低減性」

### (1) 概要と評価手順

この指標は、材料製造・利用・廃棄時の安全性を評価する指標である。安全性は情報である。すなわち、安全であるかどうかは、そのものが有害かどうかの白黒よりも、正確な材料情報を把握して提供できるかにかかっている。

2001年、ソニーの家庭用ゲーム機に使用されていた赤色配線のビニール被覆から規制値を超えるカドミウムが検出され、日本の電子業界は大きなダメージを受けた。これは自社製品のビニール被覆に含まれる元素を、正確に把握していなかったことが原因である。

アスベストは昭和40年代まで安価で成形性に優れた難燃材として多く利用されていた。アスベストを構成するMg、Si、Ca、Feの酸化物そのものはスラグと同様の組成で、安定で安全な物質である。しかしマイクロ繊維の状態で呼吸器系に吸引・付着されると、呼吸器疾患や中皮腫を引き起こす。日本において長年に亘り多くの健康被害を被ったのは、材料形態に由来する正確な情報が提供されなかったことが原因である。最近では、マイクロサイズからナノサイズの物質の安全性が広く議論されるようになっている。

このように、材料の安全性を議論する場合には、まず材料中の含有成分および含有物質をどの精度で把握して

表2 相対値からポイントへの換算表

| $R_i$                | $P_i$ |
|----------------------|-------|
| $R_i=0$              | 0     |
| $0 < R_i \leq 0.5$   | 1     |
| $0.5 < R_i \leq 1$   | 2     |
| $1 < R_i \leq 1.5$   | 3     |
| $1.5 < R_i \leq 2$   | 4     |
| $2 < R_i \leq 2.5$   | 5     |
| $2.5 < R_i \leq 3.5$ | 6     |
| $3.5 < R_i \leq 5$   | 7     |
| $5 < R_i \leq 7$     | 8     |
| $7 < R_i \leq 10$    | 9     |
| $10 < R_i$           | 10    |

In case of no data,  $R_i=0$

いるか、それらの有害情報をどの程度把握しているかが第一のポイントである。次に使用段階および焼却・埋め立て段階における排出物質について把握しているか、そして有害情報をどの程度把握しているかが第二のポイントとなる。

評価は、a)製造、b)利用、c)焼却・埋め立ての三段階から成る。

#### a) 製造段階

- 材料を構成する元素、物質、マイクロ・ナノサイズ材料についてどのレベルで何種類把握しているかを記入する。
- 把握している場合はその数を記入し、それぞれについて有害性情報を何種類程度把握しているかを記入する。
- 把握している有害性情報の数を、換算表を用いてスコアに換算する。
- 元素、物質、マイクロ・ナノ材料、それぞれのスコアを算術平均して、スコア<sub>製造段階</sub>を算出する。

#### b) 利用段階

- 材料を構成する元素、物質、マイクロ・ナノサイズ材料について何種類把握しているかを記入する。
- 把握している場合はその数を記入し、それぞれについて有害性情報を何種類程度把握しているかを記入する。

- iii) 把握している有害性情報の数を、換算表を用いてスコアに換算する。
  - iv) 元素、物質、マイクロ・ナノ材料、それぞれのスコアを算術平均して、スコア<sub>使用段階</sub>を算出する。
- c) 焼却・埋め立て段階
- i) 材料を構成する元素、物質、マイクロ・ナノサイズ材料について何種類把握しているかを記入する。
  - ii) 把握している場合はその数を記入し、それぞれについて有害性情報を何種類程度把握しているかを記入する。
  - iii) 把握している有害性情報の数を、換算表を用いてスコアに換算する。
  - iv) 元素、物質、マイクロ・ナノ材料、それぞれのスコアを算術平均して、スコア<sub>焼却・埋め立て段階</sub>を算出する。

## (2) 具体的評価シートについて

表3に具体的な評価シートを示す。

Q1は製造段階に関するもので、元素、物質、マイクロ・ナノ材料の3項目から成る。

まず、対象とする材料中に存在する元素の中で、濃度別に把握している範囲で元素数を記入する。それらの元素について、WHOのGHS(Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals)で規定されている12種類の毒性の中で把握している毒性の数を算術平均して記入する。例えば、「Element < 100ppm」の範囲で把握している元素数(N)が3とする。3つの元素A,B,Cについて、元素Aは1種類の毒性、元素Bは3種類の毒性、元素Cは2種類の毒性を把握しているとする、毒性の平均数(H)は2となる。Hの数から、換算表を元にして、スコア(S)に換算して記入する。この例ではスコアは0.3となる。以降、同様の作業で含有物質に関するスコア、およびマイクロ・ナノ材料に関するスコアを記入していく。最後に、元素、物質、マイクロ・ナノ材料の3項目のスコアを算術平均して、スコア(Q1)を求める。

GHSで規定されている毒性は次の通りである<sup>1)</sup>。

### ・健康に関する有害性

- 急性毒性
- 皮膚腐食性・刺激性
- 眼に対する重篤な損傷・眼刺激性
- 呼吸器感作性又は皮膚感作性
- 生殖細胞変異原性
- 発がん性
- 生殖毒性
- 特定標的臓器・全身毒性（単回ばく露）
- 特定標的臓器・全身毒性（反復ばく露）
- 吸引性呼吸器有害性

### ・環境に対する有害性

水生環境急性有害性

水生環境慢性有害性

Q2は利用段階に関するもの、Q3は焼却・埋め立て段階に関するものである。Q1と同様の作業により、スコアを記入し、スコア(Q2)およびスコア(Q3)を求める。

最終的に、スコア(Q1)、スコア(Q2)、スコア(Q3)を算術平均して、指標スコアを算出する。

## 6. おわりに

材料・材料製品の環境情報を表示するための指標が開発され整備されると、環境技術に優れた材料の国際競争力が高まることとなり、環境に配慮した材料の開発が促進されるものと期待される。さらに環境に配慮した材料が自由貿易下で国際的に普及するようになると、地球規模で工業製品の環境負荷を削減することに繋がる。本研究の成果が持続可能な発展に向けての基盤形成に貢献するものと期待する。

## 参考文献

- 1) 独立行政法人 製品評価技術基盤機構 HP  
([http://www.safe.nite.go.jp/ghs/ghs\\_index.html](http://www.safe.nite.go.jp/ghs/ghs_index.html)) 2010.6.21

## 謝辞

本研究は、国際共同研究助成事業（プロジェクト ID: 2005IS180）により実施された。

表3 指標「環境影響物質の低減性」の評価シート

This form is to declare how many hazard items you recognize on your trade material or article to fulfill your corporate social responsibility.

Q1. Do you have the contents (elements, substances and component materials) hazard data of the trade material or article at the fabrication stage?

**Fabrication Stage**

| Element hazard | Contents           |                        | Number of hazard items with data (H)* | Score (S)** | Average score (S1) |
|----------------|--------------------|------------------------|---------------------------------------|-------------|--------------------|
|                | Range              | Number of elements (N) |                                       |             |                    |
|                | Element ≥ 1,000ppm | ( )                    | ( )                                   | ( )         | ( )                |
|                | Element < 1,000ppm | ( )                    | ( )                                   | ( )         |                    |
|                |                    | In case of no data     |                                       | 0           |                    |
|                | Element < 100ppm   | ( )                    | ( )                                   | ( )         |                    |
|                |                    | In case of no data     |                                       | 0           |                    |
|                | Element < 10ppm    | ( )                    | ( )                                   | ( )         |                    |
|                |                    | In case of no data     |                                       | 0           |                    |

  

| Substance hazard | Contents             |                          | Number of hazard items with data (H)* | Score (S)** | Average score (S2) |
|------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------------|-------------|--------------------|
|                  | Range                | Number of substances (N) |                                       |             |                    |
|                  | Substance ≥ 1,000ppm | ( )                      | ( )                                   | ( )         | ( )                |
|                  | Substance < 1,000ppm | ( )                      | ( )                                   | ( )         |                    |
|                  |                      | In case of no data       |                                       | 0           |                    |
|                  | Substance < 100ppm   | ( )                      | ( )                                   | ( )         |                    |
|                  |                      | In case of no data       |                                       | 0           |                    |
|                  | Substance < 10ppm    | ( )                      | ( )                                   | ( )         |                    |
|                  |                      | In case of no data       |                                       | 0           |                    |

  

| Micro-nano hazard | Contents          |                                   | Number of hazard items with data (H)* | Score (S)** | Average score (S3) |
|-------------------|-------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------|--------------------|
|                   | Range             | Number of component materials (N) |                                       |             |                    |
|                   | Dimension < 10μm  | ( )                               | ( )                                   | ( )         | ( )                |
|                   |                   | In case of no data                |                                       | 0           |                    |
|                   | Dimension < 100nm | ( )                               | ( )                                   | ( )         |                    |
|                   |                   | In case of no data                |                                       | 0           |                    |

$$\text{Score (Q1)} = S1+S2+S3$$

Q2. Do you have the environmental emissions (elements, substances and component materials) hazard data of the trade material or article at the usage stage?

**Usage Stage**

| Element hazard | Emissions |                        | Number of hazard items with data (H)* | Score (S)** | Average score (S1) |
|----------------|-----------|------------------------|---------------------------------------|-------------|--------------------|
|                | Range     | Number of elements (N) |                                       |             |                    |
|                | All       | ( )                    | ( )                                   | ( )         | Same as the left   |
|                |           | In case of no data     |                                       | 0           |                    |

  

| Substance hazard | Emissions |                          | Number of hazard items with data (H)* | Score (S)** | Average score (S2) |
|------------------|-----------|--------------------------|---------------------------------------|-------------|--------------------|
|                  | Range     | Number of substances (N) |                                       |             |                    |
|                  | All       | ( )                      | ( )                                   | ( )         | Same as the left   |
|                  |           | In case of no data       |                                       | 0           |                    |

  

| Micro-nano hazard | Emissions        |                                   | Number of hazard items with data (H)* | Score (S)** | Average score (S3) |
|-------------------|------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------|--------------------|
|                   | Range            | Number of component materials (N) |                                       |             |                    |
|                   | Dimension < 10μm | ( )                               | ( )                                   | ( )         | Same as the left   |
|                   |                  | In case of no data                |                                       | 0           |                    |

$$\text{Score (Q2)} = S1+S2+S3$$

Q3. Do you have the environmental emissions (elements, substances and component materials) hazard data of the trade material or article at the incineration and/or landfill stage?

**Incineration and/or Landfill Stage**

| Element hazard | Emissions |                        | Number of hazard items with data (H)* | Score (S)** | Average score (S1) |
|----------------|-----------|------------------------|---------------------------------------|-------------|--------------------|
|                | Range     | Number of elements (N) |                                       |             |                    |
|                | All       | ( )                    | ( )                                   | ( )         | Same as the left   |
|                |           | In case of no data     |                                       | 0           |                    |

  

| Substance hazard | Emissions |                          | Number of hazard items with data (H)* | Score (S)** | Average score (S2) |
|------------------|-----------|--------------------------|---------------------------------------|-------------|--------------------|
|                  | Range     | Number of substances (N) |                                       |             |                    |
|                  | All       | ( )                      | ( )                                   | ( )         | Same as the left   |
|                  |           | In case of no data       |                                       | 0           |                    |

  

| Micro-nano hazard | Emissions        |                                   | Number of hazard items with data (H)* | Score (S)** | Average score (S3) |
|-------------------|------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------|--------------------|
|                   | Range            | Number of component materials (N) |                                       |             |                    |
|                   | Dimension < 10μm | ( )                               | ( )                                   | ( )         | Same as the left   |
|                   |                  | In case of no data                |                                       | 0           |                    |

$$\text{Score (Q3)} = S1+S2+S3$$

**\* Number of hazard items with data (H)**

Count the number of hazard items with the evaluated hazard data in the following 12 hazard items based by WHO:  
on Globally Harmonized System of Classification and Labeling of Chemicals

(Max.H is 12.)

(If the tarde material or article is composed of plural elements, substances or component materials,  
the average count of items for all elements, substances or component materials is adopted.)

**Health hazard**

- 1 Acute toxicity
- 2 Skin corrosion/irritation
- 3 Serious eye damage/eye irritation
- 4 Respiratory or skin sensitization
- 5 Germ cell mutagenicity
- 6 Carcinogenicity
- 7 Reproductive toxicity
- 8 Specific target organ systemic toxicity single exposure
- 9 Specific target organ systemic toxicity repeated exposure
- 10 Aspiration hazard

**Environmental hazard**

Hazardous to the aquatic environment

- 11 (acute)
- 12 (chronic)

**\*\* Score (S)**

When N is 0, S is 1.

When N is not 0, S is obtained from the number of hazard items with data (H) by the following table.

| Number of hazard<br>items with data (H)* | 0   | $0 < H \leq 1$ | $1 < H \leq 2$ | $2 < H \leq 3$ | $3 < H \leq 4$ | $4 < H \leq 5$ | $5 < H \leq 7$ | $7 < H \leq 9$ | $9 < H \leq 11$ | $11 < H \leq 12$ |
|------------------------------------------|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|------------------|
| Score                                    | 0.1 | 0.2            | 0.3            | 0.4            | 0.5            | 0.6            | 0.7            | 0.8            | 0.9             | 1                |