

環境・エネルギー分野の体系化

(その1) 上流対策と下流対策のベストミックス

松村 眞

はじめに

ほとんどの理工学分野は、それなりに体系化されているから、全体の構成を示す「総論」があつて「各論」がある。ところが環境とエネルギーの分野は、範囲が広いこともあつて、総論がないままに膨大な各論があるといつてよい。現在、多くの大学に環境と名のつく学部や学科があるが、総合的な体系がないまま個別の分野を対象にしているので、学科や科目の共通性が低い。名称が似ていても内容が異なることが多いから、外部からは専門性を客観的に評価することができない。一方、産業界では多くの企業に環境保全、環境管理、エネルギー管理などの組織があるが、同じ業種でも対象範囲や内容に大きな隔たりがある。このような状況から、環境とエネルギーの分野は「体系化」が必要ではないかと思うようになった。体系化は環境とエネルギー分野の全体構成を示す「総論」に相当する。普遍的な総論があれば、関係者は担当する各論が総論のどの部分に該当するのか、また他の各論とどのような関連性があるのか理解しやすくなるであろう。そこで本稿では、初めに環境対策の階層構成について述べ、問題ごとに次元の異なる対策のベストミックスが存在することを示す。次に環境問題の全容を体系的に示す。続いて環境対策群を、環境負荷を抑制する上流分野と、環境負荷を無害化する下流分野に分けて述べる。ここまでが環境問題と環境対策の体系化である。本稿の最終節では、化学産業がこの分類体系に沿ってどのように環境保全に寄与しているか具体的に示す。

なお、本稿には 2011 年発刊の「改訂七版 化学工学便覧：丸善出版」に筆者が掲載した「環境化学工学」を引用している。また、SCE・Net の「窓」に掲載した「環境対策の階層構成とベストミックス」と重複する部分がある。さらに、本稿は化学装置の 2018 年 4 月号に掲載されたので、出版社の許可を得て転載する。

1. 環境対策の階層

よく聞く言葉だが、「環境装置」というのは具体的に何を指しているのだろうか。たとえば自動車の場合を想像してみよう。まず思いつくのはマフラーである。マフラーはエンジンで発生する爆発音を消すための「処理」装置だからである。次に思いつくのはマフラー

の前にある排ガス燃焼装置であろう。触媒が入っているこの装置が、排ガスに含まれている炭化水素と一酸化炭素を、害のない二酸化炭素と水蒸気に変える処理装置だからである。でもこれだけだろうか。最近は多くの車にコンピューターを利用した燃焼制御装置がついており、エンジンに送り込む空気の量を調節して窒素酸化物の発生を防いでいる。だから燃焼制御装置も環境装置に入るだろう。でも、この場合は発生する窒素酸化物を無害化するのではなく、発生を防ぐ「予防」装置である。住宅の場合も同様で、浄化槽は廃水を「処理」する装置だが、節水トイレは廃水の発生を少なくする「予防」装置である。工場の場合は、排水処理設備や排ガス処理設備が汚染物質を無害化する「処理」装置である。一方、ボイラーの排熱を回収する熱交換器や水の循環再利用設備は、エネルギーや水の利用効率を高め、排ガスや廃水の発生を抑制する「予防」の環境装置である。こうしてみると、環境装置には汚染物質の発生を少なくする「予防」の分野と、発生する汚染物質を無害化する「治療」の分野があり、環境技術や環境対策にもこの2種類があることがわかる。

ところで予防の分野は、さらに上流から下流に細分化することができる。最上流は耐久消費財の消費と廃棄を少なくする需要の抑制で、製品の長寿命化やリサイクルが、この分野に相当する。二番目は燃料や原料のクリーン化である。日本はエネルギー源を石炭から煤塵の発生が少ない石油に、石油から硫黄酸化物の発生が少ない LNG（液化天然ガス）に転換して大気汚染を改善した。三番目は燃料や原料が利用者に届く前に、含まれている汚染物質を除去する前処理である。日本は製油所が石油から硫黄分を除去して、工場のボイラーから発生する硫黄酸化物を低減した。四番目は、資源とエネルギーの利用効率を高める省資源・省エネルギーである。資源の利用効率を高めれば廃棄物の発生が少なくなり、省エネルギー対策は排ガスの発生を少なくする。

一方、治療の分野も上流から下流に細分化できる。治療の最上流対策は、汚染物質の発生者が自ら処理する発生源処理である。硫黄酸化物をボイラーの排煙から除去する排煙脱硫、粒子状物質を分離して除去する集塵、窒素酸化物を分解する排煙脱硝が代表的な発生源処理である。廃水処理も固形物や有害物質の除去など、下水道に投入するまでの前処理が発生源処理である。廃棄物処理も、毒性、爆発性、引火性など、集中処理を妨げる危険物の除去が発生源処理である。治療の二番目は、下水処理や清掃工場の廃棄物焼却のように、環境負荷物質の輸送をとまなう集中処理である。三番目は廃棄物の最終処分、不燃ごみや焼却残渣の埋立て処分が相当する。四番目は最下流対策で、不注意や環境意識の欠如のために汚染された土壌の浄化や、汚染された湖沼の環境改善が該当する。容易に想像できるように、最下流の環境修復は上流対策に比べて非常に費用対効果が劣る。以上の予防と治療の対策を整理すると表1になる。

表 1. 環境対策の予防と治療

予防 対策	需要の抑制：製品の長寿命化、リユース、廃棄物の資源化再利用など
	燃料や原料のクリーン化：LNG転換、自然エネルギー利用、低硫黄石炭使用など
	燃料や原料からの汚染物質除去：燃料脱硫、石炭の洗炭など
	省資源と省燃料：省エネルギー、水の循環再使用、原料の歩留まり向上など
治療 対策	発生源処理：排煙脱硫、集塵、排煙脱硝、脱臭、廃水中の固形分除去など
	集中処理：下水処理、産業排水共同処理、清掃工場の焼却処理、産廃集中処理など
	最終処分：埋め立て処分
	汚染修復：汚染土壌修復、富栄養化湖沼の改善、砂漠の緑化、伐採地の植林など

2. 環境対策のベストミックス

前節では環境対策に予防と治療の分野があり、それぞれに上流から下流まで数段階があることを述べた。では具体的な環境問題に対して、どの段階の対策が有効なのだろうか、またどの段階の対策が費用対効果に優れているのであろうか。環境問題といっても地球規模の環境問題もあれば、悪臭や騒音のように地域的な環境問題もある。大気や水質の環境問題もあるし、廃棄物も環境問題である。したがって問題ごとに、各段階の環境対策があるだろうが、本節では九つの地球環境問題を例に段階別の環境対策を考えてみる。

表 2 は地球環境問題を横軸に、環境対策の段階を縦軸に有効性を整理したものである。環境問題と環境対策の関連性を示すのが目的なので、厳密性に欠けるかもしれないが、わかりやすいマトリックス形式で示した。環境問題と環境対策は、それぞれ一対一でしか対応できないのではなく、一つの環境問題に複数の段階の異なる対策がある。たとえば地球の温暖化を抑制するには、消費財の長寿命化やリユース・リサイクルも有効である。というのも、それだけ新製品の製造に必要なエネルギーが少なくて済むからで、最上流の対策といえよう。石炭や石油を、温室効果ガスの発生が少ない LNG に転換する二番目の上流対策も、地球温暖化の抑制に大きな効果がある。四番目の上流対策である省エネルギー対策も、エネルギー需要を抑制し、二酸化炭素の発生量を減らす上流分野の予防対策である。治療の分野になる下流の対策としては、ボイラーの排ガスから二酸化炭素を分離し、海底に貯蔵する方法が研究されている。しかし莫大なエネルギーと費用が必要になるので、筆者としては実現性に疑問があると考えている。このように地球温暖化には段階の異なる 4 分野が考えられるが、このうちの 3 分野が現実的で有益であろう。

次のオゾン層の破壊はどうだろうか。オゾン層の破壊はクロロフルオロカーボン（CFC）や、その他のフロン類に含まれている塩素が原因である。フロン類は沸点の低い気体だから、環境に放出されれば回収できないし、利用分野が広いので環境への放出を完全に防ぐこともできない。したがって予防は可能だが治療は不可能である。このため、対策としては製造も使用も禁止し、需要をなくす最上流の対策しか存在しない。では酸性雨の問題はどうか。酸性雨の原因は、化石燃料の燃焼排ガスに含まれている硫黄酸化物と窒素酸化物である。したがって予防分野の対策は、最上流の製品需要の抑制によるエネルギー使用量の低減、二番目の硫黄分の少ない燃料への転換、三番目の燃料に含まれる硫黄分の事前除去が非常に有効である。四番目の省エネルギー対策は、同じ量のエネルギーをより少ない燃料で供給できるようにする。このため、燃料の削減量に比例して硫黄酸化物と窒素酸化物の発生が少なくなり、酸性雨の抑制に寄与する。一方、治療分野の対策では、硫黄を含む燃料を使用するボイラーの排煙脱硫が大きな役割を果たす。酸性雨の問題では、予防側の4段階と治療側の1段階が有効なのである。

次に熱帯林の減少はどうであろうか。熱帯林に限らず、人類はかつて存在した多くの森林を失い、ほとんど回復できていない。森林を元の状態に回復するには伐採を止め、植林したうえで、さらに数十年の歳月を要するであろう。したがって熱帯林の減少を防ぐ方法としては、最上流の需要の抑制が圧倒的に重要である。治療の分野としては最下流の植林があるが、あまりに多くの手間と費用と期間が必要なので、多くを期待することができない。生物種の衰退も熱帯林の減少と同様に、採用できる選択肢は限られている。失われた生物種は回復の手段がないから、対策としては最上流の需要の抑制しか考えられない。この問題への対策は一つの段階しかないのである。

砂漠化の進行には自然環境の変化によるものと、家畜の過放牧など人為的な原因によるものがある。自然環境の変化に起因する砂漠化は防ぎようがないが、人為的な原因の場合は放牧の制限という予防対策で防ぐことができる。治療の分野では、最下流の対策として植林などの緑化事業が可能であろう。しかし多くの手間と時間がかかるのを避けられない。海洋汚染は工場の廃水に含まれる有害物質、船舶廃水の油分、および廃棄物によるものなので発生源が非常に多い。このため、発生量自体を減らす効果的な予防策を考えにくく、工場や船舶の廃水処理と、陸上での廃棄物処理の徹底という下流分野で防ぐしかない。有害廃棄物の移動に関しては、最終処分施設の整備という下流の手段しかないだろう。九番目の地球環境問題である新興国の環境汚染を軽減するには、上流の予防対策も下流の治療対策も総動員して対処する必要がある。

表2. 地球環境問題と各段階の環境対策

地球環境問題（右） 環境対策分野（下） ◎：非常に有効 ○：有効 △：疑問		地球温暖化	オゾン層の破壊	酸性雨	熱帯林の減少	生物種の衰退	砂漠化の進行	海洋汚染	有害廃棄物移動	新興国の環境汚染
予防対策・上流	需要の抑制：製品の長寿命化、リユース、リサイクルなど	◎	◎	○	◎	◎	◎			○
	燃/原料のクリーン化：LNG転換、低硫黄石炭など	○		○						○
	燃/原料からの汚染物質除去：燃料脱硫、石炭の洗炭など			◎						◎
	省資源・省燃料：省エネルギー：歩留まり向上、水循環使用など	◎		○						◎
治療対策・下流	発生源処理：排煙脱硫、集塵、排煙脱硝など	△		◎						◎
	集中処理：下水処理、清掃工場焼却など							◎		◎
	最終処分：埋め立て処分安定型/管理型など							○	◎	◎
	汚染修復：汚染土壌修復、砂漠の緑化など				△		○			○

以上のように一つの環境問題に、次元の異なる複数段階の対策があるが、問題によって有効な対策の組み合わせが異なる。たとえば地球温暖化の対策は、上流分野の予防対策が大きな役割を果たすが、酸性雨の対策は上流対策の燃料脱硫と下流対策の排煙脱硫が必要である。なお、地域によって採用可能な対策が限定される場合がある。燃料を汚染物質の少ない天然ガスに転換しようにも、パイプラインが未整備なら採用できない。また、複数段階の対策がある場合も、対策によって費用対効果に違いがあるので、対策のベストミックスを採用するのが望ましい。工場の場合も同様で、問題ごとに次元の異なる対策の組み合わせを、ベストミックスの観点から再確認するのが望ましい。筆者の体験でも、ボイラーの集塵機に大きな負荷があり、電気代が非常に大きいことに気がついた。燃料の仕様を確認したら、灰分が非常に多い再生潤滑油が使われていた。そこで値段は少し高いが規格

品の A 重油に変更したら、集塵機の負荷が大幅に減り、燃料費の増加分以上に電気代が減った。集塵機の変更ではなく、上流対策の燃料転換との組み合わせがベストミックスだったのである。ある工場は排水処理を近くの集中処理場に委託していたが、沈殿と物理化学処理しか必要ないのに処理費が高かった。調べてみたら、集中処理施設は複数の異なる工場排水を処理するため、物理化学処理の下流に生物処理工程を加えていた。そこで自社処理に変更して経費を節減した。集中処理より発生源処理の方が、費用対効果が優れていたのである。環境対策は一度決めると減多に変更しないが、固定費が高いことも多いので、定期的にベストミックスの観点から再検討したらどうか。

3. 環境問題の構成

人間が日常的に接触する環境は大気と水と廃棄物と土壌である。したがって、この四つの領域について主要な環境問題を表 3 に示す。大気の問題には、影響が地球規模や数千キロメートルの範囲に及ぶ問題と、地域の限定的な問題がある。地球規模の大気環境問題は、温暖化、酸性雨、オゾン層破壊の 3 種類である。地域の大気環境問題は、主に浮遊粒子状物質、二酸化硫黄、窒素酸化物、光化学オキシダントの 4 種類である。騒音や悪臭は大気環境より影響が狭い問題なので、大気汚染防止法の対象にはなっていない。しかし大気環境の一部であることから、大気環境問題に含めた。水質の問題には、臨海部の海洋水質環境、河川の水質環境、湖沼の水質環境がある。海洋水質環境は、生物の生存環境としての適合性を示す溶存酸素量と化学的酸素要求量が指標である。河川の水質環境指標も海洋の指標と類似しているが、水産生物の生育環境保全の視点から、化学的酸素要求量に代わって生物化学的酸素要求量が指標になる。同じ理由で浮遊物質も水質環境指標に加わる。湖沼は閉鎖性水域のために、環境負荷物質が長く滞留し拡散しにくい。このため海洋や河川よりも、溶存酸素の維持と有害物質の排除に厳格な対応が求められる。地下水も環境保全が必要な水質環境の一部である。

廃棄物は放射性廃棄物と一般の廃棄物に区分され、一般の廃棄物は生活系の廃棄物と事業系の廃棄物に区分される。生活系の廃棄物は家庭から排出される廃棄物で、可燃ごみと称する混合廃棄物のほかに、粗大ごみや容器包装廃棄物も含まれる。事業系の廃棄物は、主にサービス業から排出される事業系一般廃棄物と、産業廃棄物に区分される。事業系一般廃棄物は実態が家庭系の廃棄物と同じなので、市町村が処理処分することとされている。産業廃棄物は法令により 20 品目が指定されており、量的に多いのは汚泥、家畜の糞尿、建設工事から排出されるがれきで、全量の約 80% を占めている。排出量は一般廃棄物が年間で約 5000 万トン、産業廃棄物は約 4 億トンである。自然環境は土壌環境と自然環境に大別したが、土壌環境は農地、住宅地、工業用地に分けるのが適切であろう。農地の土壌環境は生産性と農産物の品質に影響を与えるので、栄養素や酸性度、有機物の存在などが重要

である。住宅地は人間の生活環境なので、有害物質の存在は許されない。工業用地は農地や住宅地より環境への要求が緩いが、将来にわたって工業用地として使われ続ける保証はない。したがって、住宅地に転換される可能性も考慮した環境管理が必要である。自然環境では森林や景観の保全、地域によっては砂漠化の防止が必要である。森林の破壊と砂漠化は日本では問題にならないが、外国では大きな問題なので環境問題に含めた。

表 3. 環境問題の構成

大分類	中分類		細分類：問題現象・主要汚染因子・指標	
1. 大気環境	1.1 地球の大気環境	地球温暖化：温室効果ガス		
		酸性雨：硫黄酸化物、窒素酸化物		
		オゾン層の破壊：フロン		
	1.2 地域の大気環境	浮遊粒子状物質		
		二酸化硫黄		
		窒素酸化物		
		光化学オキシダント：揮発性有機化合物		
1.3 騒音の環境	騒音：工場騒音、近隣騒音			
1.4 悪臭の環境	悪臭：工場、畜産施設			
2. 水質環境	2.1 海域の水質環境	有機物：COD（化学的酸素要求量） DO（溶存酸素量）		
	2.2 河川の水質環境	有機物：BOD、DO 有害物質：重金属 浮遊物質：SS（浮遊粒子状物質）、油分		
	2.3 湖沼の水質環境	有機物：BOD、SS、重金属、有害物質		
	2.4 地下水の環境	重金属・大腸菌・有害物質		
3. 廃棄物環境	3.1 放射性廃棄物			
	3.2 一般の廃棄物	生活系	3.2.1 一般廃棄物	特別管理一般廃棄物（危険物）
		事業系		ごみ：ごみ、粗大ごみ、資源ごみ、廃家電製品など
	3.2 一般の廃棄物	事業系	3.2.2 産業廃棄物	特別管理産業廃棄物（危険物）
		21品目（汚泥、がれき、家畜糞尿、鉍滓、煤塵、廃プラなど）		
4. 自然環境	4.1 土壌の環境	土壌環境（農地・住宅地・工業用地）		
	4.2 自然環境	日本の森林・世界の森林		
		日本の野生生物・世界の野生生物		
		世界の砂漠・日本の砂漠		

(その2) に続く