

## ■ 研究論文 ■

## 発電システムのライフサイクルにおける窒素酸化物、硫黄酸化物排出量

## Life Cycle Emission of Oxidic Gases from Power Generation Systems

野村 昇\*・稲葉 敦\*\*\*

Noboru Nomura Atsushi Inaba

外岡 豊\*\*\*\*・赤井 誠\*\*

Yutaka Tonooka Makoto Akai

(原稿受付日1997年10月14日, 受理日1998年4月14日)

## Abstract

The life cycle emission of nitric oxide and sulphurous oxide from various types of electric power generation systems was estimated. The emission from the process of building energy systems, mining and transportation of fuel was counted in as well as emission from power stations. Two types of thermal power generation systems, such as LNG fueled gas turbine combined cycle and integrated coal gasification combined cycle, and four types of natural energy systems, such as photovoltaic, hydropower, wind power and ocean thermal energy conversion, were evaluated. The estimated amounts of nitric oxide per generated electricity range from 0.06 g/kWh to 0.3g/kWh, while the amounts of sulphurous oxide range from 0.03g/kWh to 0.53g/kWh. There was a tendency for natural energy systems to emit smaller amount of nitric oxide, however, the difference was not so drastic, since exhaust gas from thermal generation is denitrified whereas other fuel combustion process is performed without denitration.

## 1. はじめに

近年の地球環境への関心の高まりの中で、人間活動が環境に直接与える影響のみでなく、間接的な影響をも含め総合的に評価を行う必要性が認識されるようになってきている。電力システムは、エネルギーシステムの中核となる大規模なシステムであり、そのライフサイクルにおける環境への影響を評価することは重要である。また、発電技術には多様な方式が存在し、これらの間の相互の比較は電力システムの環境への影響を考慮したベストミックス化のための重要な情報を与える。本報では、火力発電システムと自然エネルギーによる発電システムについて、環境へのインベントリ評価の代表的な指標である窒素酸化物、硫黄酸化物の発電システム全体でのライフサイクルにおける排出量の推定結果を報告し、エネルギー投入量、二酸化炭素

排出量との比較検討を行う。

## 2. 対象とする発電システム

本報では、代表的な火力発電システムと自然エネルギーシステムについてライフサイクル全体の排出量の推定を行う。火力発電システムについては、2000年代に導入される火力発電設備の主力となることが期待される、酸素吹石炭ガス化複合発電(IGCC)と天然ガス複合発電(GTCC)を対象として選択し、これと比較する自然エネルギーシステムについては、既に実用化段階にある太陽光発電システムおよび風力発電システム、国内での開発の余地が残されていると考えられる中小水力発電システムおよび将来的な技術発展が期待される海洋温度差発電システムを選択した。

それぞれの発電システムについて、その設備の製造および運転時において排出される大気汚染物質である窒素酸化物(NO<sub>x</sub>)、硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)の排出量の推定を行い、この結果をエネルギー消費量および地球温暖化問題で注目をあびている二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)排出量と併せて考察した。

考察の範囲は、発電システムの建設、火力発電システムの燃料の採掘および輸送、燃料の燃焼とした。発

\*工業技術院 機械技術研究所物理情報数理工学研究室主任研究官  
\*\* " " 研究調査官

〒305-8564 茨城県つくば市並木1-2

\*\*\*工業技術院 資源環境技術総合研究所エネルギー資源部エネルギー評価研究室長

〒305-8569 茨城県つくば市小野川16-3

\*\*\*\*埼玉大学経済学部社会環境設計学科教授

〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保255

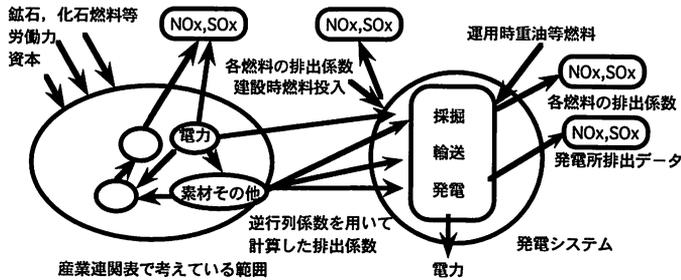


図-1 排出量の推定法

電システムの解体、素材のリサイクルについては今回の考察からは除外した。また、発電設備は日本国内の工場で製造し、国内に設置して運転することを想定し、発電設備の寿命は25年とした。

### 3. 窒素酸化物、硫黄酸化物排出量の推定法

発電システムのライフサイクルにおいて、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ が排出される原因には、

- (1) 設備製造、建設等のシステム自体を構成するのに伴う燃料燃焼による排出
  - (2) 燃料の採掘、輸送、液化等発電システムを運用するときの燃料燃焼
- があり、また火力発電システムにおいては当然
- (3) 発電時の燃料燃焼による排出

がある。これらの排出は特性がそれぞれ異なるので、排出される $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ の総量を推定するためには、異なる推定法を用いる必要がある。排出量の推定方法の概略を図-1に示した。

(1)の発電システムを構成するのに必要なエネルギー投入は、特に自然エネルギーシステムでは大きな比率を占める。資源調査会の報告では、これを素材エネルギー、製造エネルギー、建設エネルギー、輸送エネルギーに分類している<sup>1)</sup>。本報では、各システムの特性がより明確になるように自然エネルギーシステムに関しては、発電システムの製造、建設におけるエネルギー投入を発電機器と、土木、建築に分類し、これらの素材製造、製造時のエネルギー直接投入、輸送に分けて考える。一方、(2)のシステムの運用に伴う排出で主なもの、火力発電システムの燃料の採掘、輸送に起因する。

システムの製造時の燃料の燃焼に伴う $\text{NO}_x$ の排出量は、各発電システム毎の製造、建設に伴う燃料投入量に各燃料種別と燃焼条件を考慮した排出係数<sup>2)</sup>を乗じて推定した。 $\text{SO}_x$ の排出量については、脱硫装置が

設置してある火力発電所以外への燃料投入については、標準的な硫黄含有量<sup>3)</sup>から、これが全量 $\text{SO}_2$ に変化して排出されると仮定し推定した。輸送についても、投入される燃料の種類および量に基づき同様の計算を行った。

一方、投入される素材の製造時に発生する発電システムから見て間接的な排出については、産業連関表の分類別に $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ の排出量を整理したデータに基づいて推定を行った。産業連関表を用いると、逆行列係数を計算することにより生産物単価格当たりを製造するのに必要である生産量の間接投入を含めた総量が価格単位で求まる。この逆行列係数と各産業から排出される $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ の推定量とを組み合わせると、素材生産において排出される $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ の排出量の原単位を価格当たりの排出量として計算できる。本報では、昭和60年の産業連関表を用いて逆行列の計算を行った。日本の産業連関表においては、事業用電力は列分類では「原子力発電」、「火力発電」、「水力その他発電」と分割して分類され、行部門では一括して計上されている。このため、通常の産業連関表の計算法をそのまま適用するとより粗い分類である一括計上された数値が採用され、国内の電源構成を反映した平均的な量が得られるが、その数値自体の意味付けは難しくなる。本報では単純に部門統合を行うのではなく、火力発電を用いて電力の列を構成した後に逆行列係数の計算を行い、事業用の発電全体を火力発電で代表させる方法を用いた。この方法は、総合エネルギー統計等で採用されている電力のカロリー換算法を、産業連関表から自然に計算できる形にしたものである。

### 4. 火力発電システムにおける排出量の推定

ここでは、LNG複合発電 (GTCC) および酸素吹石炭ガス化複合発電 (IGCC) の発電設備のライフサイクルにおけるシステム全体からの $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ 排出

量を推定する。システム全体の構成は、LNG複合発電システムについては、東南アジアで産出する天然ガスを現地で液化後、専用タンカーにて日本に輸送し、港湾に面した発電所で燃焼、発電を行うシステムを想定し、石炭ガス化複合発電システムについては、中華人民共和国内陸部で産出する石炭を用い鉄道輸送の後専用船にて日本に輸送し発電に用いることを想定した。システムの仕様等については、エネルギー総合工学研究所（エネ総工研）により行われた調査<sup>4)</sup> <sup>5)</sup> による。想定した発電所は設備規模600万kWh、設備稼働率70%である。

以下では燃料の採掘および輸送、発電プラント各々について建設、運用による排出量の推定について述べる。

#### 4.1 燃料の採掘および輸送による排出量

火力発電システムでは、燃料を採掘し発電所まで輸送する過程で、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>が排出されることになる。

燃料採掘に先だつ探査、試掘で投入される資材、燃料は鉱区により変動し、推定は困難であるが、LNGについては文献<sup>5)</sup> に掲載された素材量と重油投入量を用いた。その結果、素材のためNO<sub>x</sub>1.7トン、SO<sub>x</sub>1トン程度、動力を得るために、NO<sub>x</sub>0.4ton/year、SO<sub>x</sub>0.2ton/year程度の排出があると推定され、発電所のライフサイクルにおける全排出量に占める割合は1%以下であった。石炭の採掘についても、排出量は無視しえる量と考えられるので、推定から捨象した。

燃料の採掘を行い輸送に備える段階における運用時には多量の燃料が投入され、これに伴うCO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>の排出量はライフサイクル全体において無視しえない比率を占める。

石炭火力発電システムでは、採掘時に多くのエネルギーが投入される。採炭時におけるNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>の排出量は、採炭、選炭設備の素材使用の見積りと運用時の投入から排出量を見積もった。採炭のための動力をえるための燃料燃焼によるNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>は総排出量において無視しえない割合を占める。一方、LNGを燃料とするシステムでは、燃料の採掘のためのエネルギー投入は必ずしも大きくないが、液化動力をえるため採掘されたガスの一部を燃焼させており、このためNO<sub>x</sub>が排出される。これらの排出についても、文献<sup>5)</sup> により推定を行った。

採掘された燃料を火力発電所に輸送するに当たって、LNGについてはガス田および液化設備が港湾の近くに立地していると仮定し海上輸送のみを考え、石炭に

ついては鉄道による陸上輸送も考察に含めた。

輸送のための設備として、専用タンカー、港湾施設等があるが、これらの建設資材製造におけるNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>排出量は、資材投入量と産業連関表を用いて推定した排出係数から推定した。

海上輸送には、LNGについてはA重油のボイラー焚きの専用タンカー、石炭についてはC重油を燃料とするディーゼル機関駆動の専用船が用いられると仮定した。燃料消費量は、タンカーのトン数、速度を仮定し、燃料消費量を予測する式<sup>6)</sup> より算出し、LNG積載時には、ボイラオフガスを燃料として用いるものとした。陸上輸送は、電化された鉄道を仮定し電気機関車による輸送を想定して排出量の推定を行った。

#### 4.2 発電所からの排出量

発電プラント本体建設、発電プラントを建設するために必要な素材等については、文献<sup>5)</sup> による。

発電時の燃焼により排出される排出ガスは脱硝、脱硫装置を通過するので、環境への排出量は燃焼条件の他に排出ガスの処理により大きく変化する。現在日本で計画されているLNG複合発電プラントでは、NO<sub>x</sub>濃度10ppm前後が期待されており、電力量当たり二酸化窒素換算で0.1~0.2g/kWh程度の排出量が期待されている。石炭ガス化複合発電プラントについても脱硝装置を付加することにより0.1g/kWh程度のNO<sub>x</sub>を低減させることは可能だと考えられるので、今回は両発電方式ともにNO<sub>x</sub>排出量は、0.1g/kWhとして集計を行った。

#### 4.3 火力発電システムからの排出量

火力発電システムのライフサイクルにおける排出量、エネルギー投入量の推定結果を表1に示す。送電電力1kWh当たりのNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>排出量を集計すると、それぞれGTCCで0.20g/kWh、0.02g/kWh、IGCCで0.38g/kWh、0.53g/kWhとなった。エネルギー投入量およびCO<sub>2</sub>排出量は、原則として報告書<sup>5)</sup> によったが、素材製造関連の部分については産業連関表からの計算値を用い、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>排出量との整合をとった。表1より、発電時の排出量もさることながら、LGN複合発電システムにおける液化時、石炭ガス化複合発電システムにおける採炭時、および輸送時の船舶からの排出量も無視しえないことが顕著である。輸送時のSO<sub>x</sub>の排出量が大きく異なるのは、発電方式により起因するのではなく輸送時に用いる燃料の種類の違いに起因する。なお、異なる燃料の使用を仮定したのは、現在の状況のもとでシステムを運用する場合

表1 火力発電システムにおける排出量，エネルギー投入量

## (1) LNG複合発電システム

		CO <sub>2</sub> 排出量(ton)	NO <sub>x</sub> 排出量(ton)	SO <sub>x</sub> 排出量(ton)	エネルギー投入量(kcal)
設備 (全期間)	探査，試掘	1,140	2	1	0
	採掘液化	34,800	48	33	126,000
	輸送	14,200	19	14	54,200
	発電プラント	70,500	105	66	243,000
	小計 (全期間)	120,640	173	114	423,200
運用 (年当たり)	探査，試掘	39	0	0	131
	採掘液化	124,000	296	1	602,000
	輸送	24,900	51	76	84,600
	発電プラント (補修)	846	1	1	2,920
	発電プラント (燃料燃焼)	1,450,000	368	0	6,680,000
小計 (年当たり)	1,599,785	716	78	7,369,651	

## (2) 石炭ガス化複合発電システム

		CO <sub>2</sub> 排出量(ton)	NO <sub>x</sub> 排出量(ton)	SO <sub>x</sub> 排出量(ton)	エネルギー投入量(kcal)
設備 (全期間)	採炭，選炭	51,100	69	50	189,000
	輸送	21,200	29	20	76,100
	発電設備素材	117,000	194	100	369,000
	発電設備製造，輸送，建設	23,500	39	20	73,700
	小計 (全期間)	212,800	331	189	707,800
運用 (年当たり)	採炭，選炭	151,000	282	773	382,000
	輸送	58,000	631	203	68,200
	発電設備運用	1,400	2	1	4,420
	燃焼	2,520,000	368	809	6,720,000
	小計 (年当たり)	2,730,400	1,283	1,786	7,174,620

を想定したためである。設備の製造による排出量は、システムからの総排出量が小さいLNG発電におけるSO<sub>x</sub>排出量を除き、運用時の1年間あたりの排出量より少なく、設備寿命が数十年あることを考慮すると運用で排出される量に比べ無視できるほど小さい。

## 5. 自然エネルギーシステムにおける排出量

自然エネルギーシステムには燃料投入は存在しないので、システムの製造および建設にける排出が排出量の大部分を占める。以下にそれぞれの発電システムについての排出量の推定法について記す。

## 5.1 風力発電システムの排出量

風力発電システムの排出量の推定では、資源調査会により調査されたダウンウインド型でロータ径30mのプロペラ式、タワー高さ30m、出力100kWの設備<sup>1)</sup>を対象にした。この調査では、素材投入量と製造、建設、輸送までを含めた投入エネルギー量が調査されて

おり、このデータに基づき、燃料燃焼量を推定し、直接的なエネルギー投入によるNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>排出量を求めた。

素材エネルギーに対応したNO<sub>x</sub>およびSO<sub>x</sub>の排出量については、各素材に対応する産業連関表にあてはめ産業連関表より算出される排出原単位を乗じて推定した。製造時に直接投入されるエネルギーについては、電力には日本の火力発電による標準的な排出量を、燃料燃焼は、各産業の標準的な排出係数により排出量の推定を行った。建設に関しては、電力および燃料の直接投入と建設機械の減耗を考察に含め、建設機械の燃料直接投入については、科学技術政策研究所の調査で取り上げられているディーゼルエンジンの標準的な排出係数<sup>3)</sup>を適用し、建設機械の減耗については、産業連関表を用いて求めた鉄の排出係数を用いた。

建設に伴う輸送について資源調査会の調査では、砂利については現地調達を行うことを想定し輸送距離

表2 風力発電システム建設による排出量，投入量

	CO <sub>2</sub> 排出量(ton)	NO <sub>x</sub> 排出量(ton)	SO <sub>x</sub> 排出量(ton)	エネルギー投入量(kcal)
建設資材素材	68.37702	0.10900	0.03634	152,742,099
機械設備素材	139.51591	0.19004	0.14926	515,599,121
発電設備素材	23.36126	0.03272	0.02430	87,289,168
製造	34.78983	0.04275	0.04203	173,947,500
建設	8.75880	0.07136	0.02114	30,037,500
輸送	25.61251	0.39259	0.10915	87,100,000
合計	300.41532	0.83844	0.38223	1,046,715,388

50km, セメントおよび発電機器についてはトラック400km, 鉄道200km, 海運200kmを仮定しており<sup>1)</sup>, ここでもこの値に従い計算した。

表2に排出量, エネルギー投入量の推定結果を示す。これを総送電電力で除すと, 風力発電設備の建設時にはNO<sub>x</sub>が0.84トン, SO<sub>x</sub>が0.38トン程度排出され, 設備寿命25年間の間に送電電力1kWh当たり, NO<sub>x</sub> 0.11g/kWh, SO<sub>x</sub> 0.05g/kWh程度の排出量と推定された。表2より風力発電のエネルギー投入量とCO<sub>2</sub>排出量においては, 鉄塔, ブレードなどからなる機械設備に使用される素材が大きな比率を占めることが分かる。一方NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>排出量についてはエネルギー投入で必ずしも大きな比率を占めてない, 輸送による排出が大きな比率を占めるようになる。CO<sub>2</sub>排出量については土建用の素材がエネルギー投入, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>排出に比べ大きな比率を占める。これは, 土建用の素材で大きな割合を占めるセメントの製造により二酸化炭素が多量に排出されることに起因する。

## 5.2 太陽光発電システムの排出量

太陽光発電システムの分析においては, 化学工学会第1種研究会で調査された多結晶型の太陽電池を用いる集中型システム<sup>7)</sup>を対象とした。このシステムは, 系統連結型なので, システム内には蓄電池等を含まないが, 系統に連結するためのインバータが付加される。このシステムのエネルギー収支等は, 文献<sup>8)~10)</sup>で検討されており, 太陽電池パネルを支える架台の製造プロセスに投入されるエネルギーが発電システム全体で投入されるエネルギーに対して大きな割合を占めることが指摘されている。

太陽光発電システムの製造, 建設に伴う排出量の推定は, 原則として化学工学会第1種研究会に基づく素材およびエネルギー投入量<sup>7)</sup>により推定した。この調査では, 太陽電池の製造量増加によるスケールメリット, 技術進歩の度合により近い将来での実現可能性が高く, 生産量が多くない場合を想定したCASE1から将来の技術進歩への期待も考慮し, 生産量の増大によ

る効率の向上も加味したCASE3までの3つのシナリオについてエネルギー収支とコストについて試算がされており, 本報でもこの3種の想定についてそれぞれ推定を行った。報告書<sup>7)</sup>では, 太陽電池パネルの製造エネルギー投入については, 製造時に投入される素材およびユーティリティ, パネルおよび主要材料の製造のための装置, 工場の建屋のコストが推定されている。NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>の排出量は, コストを産業連関表を用いて計算された各財生産に必要なエネルギー投入, 排出量に乗じて推定した。Balance of System (BOS)と呼ばれる土木建設部分, 架台, インバータ等の付属機器についてもそれぞれ土木部分, 機器分に分解して排出原単位を乗じた。架台を除く土木工場の部分については, 素材と動力に分解するための情報が入手不可能なため, 土木部分としてまとめて推定を行い, さらにその全体に占める比率が小さいことが判明したので動力エネルギーに一括計上した。化学工学会研究会による調査<sup>7)</sup>では, 製品の輸送エネルギーを考慮していないので, 資源調査会による調査<sup>1)</sup>を参考に, 太陽電池パネルおよび架台を距離400kmをトラック輸送するものとして, 輸送エネルギーおよびこれに伴う排出量を推定し全体の排出量に加えた。インバータ, 制御装置に起因する排出量も小さいので, 機器の素材部分に含めて計上した。エネルギー投入については, 電力, 重油が直接投入されるものについては文献<sup>7)</sup>の値を用い, 素材等NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>排出量を産業連関表を用いたところについては, 連関表の計算に用いている燃料燃焼量を用いて計算を行った。CO<sub>2</sub>排出量については, エネルギー投入量の計算に準じて計算を行った。計算の結果, 太陽光発電システムのライフサイクルにおける, NO<sub>x</sub>排出量は, 0.2g/kWh~0.4g/kWh, SO<sub>x</sub>排出量は, 0.13g/kWh~0.16g/kWhと推定された。NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>排出量についても, 文献<sup>8)~10)</sup>でエネルギー投入, CO<sub>2</sub>排出について指摘されていたのと同様に土木関係の素材が35%~53%を占める。これは, 太陽電池を積載する架台に大量の鉄が投入され, この製造時

表3 水力発電システム建設による初期排出量, エネルギー投入量

	CO <sub>2</sub> 排出量(ton)	NO <sub>x</sub> 排出量(ton)	SO <sub>x</sub> 排出量(ton)	エネルギー投入量(kcal)
建設資材素材	7,041	12,511	2,064	9,702
土木設備素材	361	0,451	0,350	1,331
電気主要素材	504	0,703	0,555	1,823
発電付帯設備	62	0,109	0,082	214
製造	110	0,135	0,132	548
建設	8,780	42,127	11,177	35,565
輸送	457	6,210	1,009	1,551
合計	17,314	62,250	15,370	50,734

にNOx, SOxが発生するためである。

### 5.3 水力発電システム

自然エネルギーシステムの代表的なシステムである水力発電システムについて、今後国内での開発の余地が残されていると考えられている中小水力発電システムを対象に推定を行った。発電所の仕様等は資源調査会で調査されたもの<sup>1)</sup>を対象とし、推定には、風力発電システムと同様の方法を用いた。

水力発電システムの建設、運用に伴い排出されるNOx, SOxの量は、1 kWh当たり0.06g/kWh, 0.02g/kWhと推定され、投入されるエネルギーおよび排出されるCO<sub>2</sub>, NOx, SOxの排出量をまとめると表3のようになった。表3からも分かるように水力発電システムへの排出は、発電用の電気、機械装置に関わるものよりも土木工事に関連した素材投入、動力投入が大きな比率を占めることが分かる。また、NOxの排出量の比率は、輸送に起因するものがエネルギー投入に比べ大きくなる。

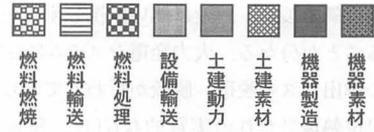
### 5.4 海洋温度差発電システム

海洋温度差発電システムは、自然エネルギーシステムのなかで比較的设备が大型となる。発電システムの仕様などについては、風力発電システムと同様に資源調査会による報告書<sup>1)</sup>に従った。想定した設備は定格出力2,500kWh, 設備稼働率80%, 所内率50%である。推定は風力発電システムと同様な方法を用いたが、海洋温度差発電システムの建設において大量に用いられるチタンについては、推定結果におよぼす影響が大きいと考えられ、かつ産業連関表において独立した項目として調査が行われていないので、文献<sup>11)</sup>に基づいた電力消費量、燃料投入量を基に、産業連関表から計算した発電時の標準的な排出係数、環境庁により発表されている燃料、炉種別の標準的な排出係数<sup>7)</sup>を用いて製造時の排出係数を推定し直した。

排出量の大きな比率を占めるのは発電機器の素材製造で、NOx排出量を除き半分前後を占める。この中でも蒸発器、凝縮器に代表される大型の熱交換用の機器の製造が大量の素材投入を必要とするので影響が大きくなる。

## 6. 推定結果のまとめ

発電電力量当たりのエネルギー投入量およびCO<sub>2</sub>, NOx, SOxの排出量の推定結果を図-2より図-5までに示す。大気汚染物の排出量については火力発電システムからの排出もさるこながら自然エネルギーシステム



排出量の内訳は上記参照

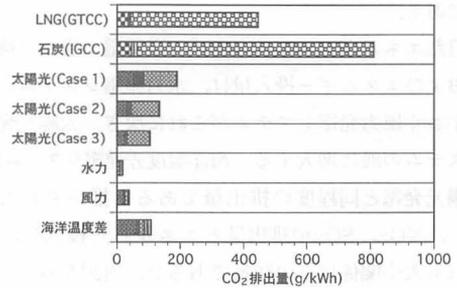


図-2 発電種別の二酸化炭素排出量

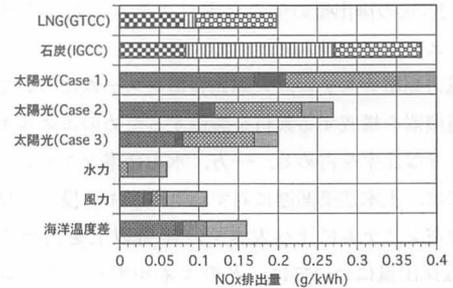


図-3 発電種別毎の窒素酸化物排出量

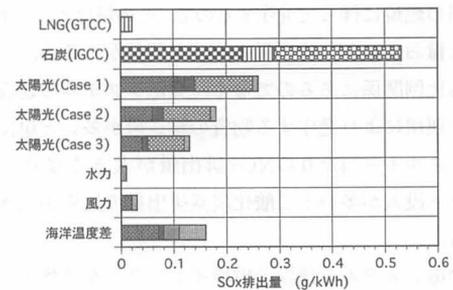


図-4 発電種別の硫酸酸化物排出量

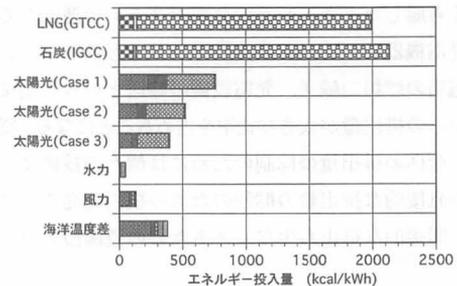


図-5 発電種別毎のエネルギー投入量

でも発電設備の製造、建設に伴い無視しえない量の排出があることが分かる。火力発電システムにおいては、発電所の排出ガスの脱硝、脱硫が行われており、化石燃料の単位熱量当たりの実質的なNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>の排出量が小さくなるのが、この様な結果となる主要な原因である。

自然エネルギーシステムでは、送電電力当たり排出量およびエネルギー投入量は、水力発電システムが一番小さく風力発電システムがこれに次ぎ、太陽光発電システムの順に増大する。海洋温度差発電システムは、太陽光発電と同程度の排出量であると推定された。CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>の排出量とエネルギー投入は、いずれも大小関係はこの順番であるが、内訳をみると水力発電システムでは、土木工事に係る投入動力が大きく、NO<sub>x</sub>の内燃機関からの排出量が多いと考えられ、NO<sub>x</sub>の排出量の他の発電システムに対する比率が、エネルギー投入に比べて大きい。

風力発電システム、太陽光発電システムについては発電機器を構成する素材を製造するためのエネルギーが大きな比率を占める。一方、水力発電システムについては、土木建築関連に対するエネルギー投入がほかの発電システムに比べ大きく、半分以上を占める。NO<sub>x</sub>排出量については、どのエネルギーシステムに対しても熱量当たりの排出係数の大きな、輸送の占める比率が大きいと推定された。NO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>の排出は、燃料の燃焼に伴って発生するので、その量はエネルギー投入量およびCO<sub>2</sub>排出量と密接な関係があるが、必ずしも比例関係にあるのではなく、発電システムの建設および運用により発生する物資の輸送量が多いと単位投入エネルギー当たりのNO<sub>x</sub>排出量が大きくなり、セメント投入が多いと二酸化炭素排出量の比率が大きくなる。

発電システムの建設の環境インパクトを考察するときには、この差は無視しえないものと考えられる。発電システムのライフサイクル全体のNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>排出量を考慮したとき、個々の発電システムの運用あるいは発電機器の製造から直接排出されるもののみでなく、発電用の燃料の輸送、発電設備の輸送といった間接部分からの排出量が大きな比率を占めることになる。従って、全体の排出量の抑制のためには個々の技術についての直接的な排出量の抑制のための技術開発のみでなく、間接的な排出も少なくするための資源投入量の抑

制、効率化を考慮したシステム全体の設計を行うことが重要となる。

本報では、環境への影響についてNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>の排出量を取り扱ったが、エネルギーシステムの評価には、このほかの様々な要因を考慮する必要がある。例えば、排出されたNO<sub>x</sub>、SO<sub>x</sub>が環境に与えるダメージの大きさは、排出される地点、気候等に影響を受ける。また、大規模なシステムの設計においては、コスト要因も無視することができない。高いコストは、導入の障害になるのみならず、間接的に社会的に望ましくない要因が反映されている場合もあるので、システム全体のライフサイクルを考慮した評価が大切になる。一方、環境への影響の観点から望ましいシステムでもコストが高いと導入が進まない恐れがあり、環境へのダメージの大きさ、コストとのトレードオフを考慮したエネルギーシステムの総合的な評価が重要である。今後、より総合的な評価を押し進めていきたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 資源調査会；エネルギー収支からみた自然エネルギー利用技術の評価手法に関する研究（1982），科学技術庁。
- 2) 環境庁大気保全局大気規制課編；窒素酸化物総量規制マニュアル（改定版）（1993），公害研究対策センター。
- 3) 科学技術庁科学技術政策研究所編；アジアのエネルギー利用と地球環境（1992），大蔵省印刷局。
- 4) エネルギー総合工学研究所；火力発電プラントからのCO<sub>2</sub>システムに関する調査（II）（1993），新エネルギー・産業技術開発機構。
- 5) エネルギー総合工学研究所；地球環境から見た総合的化石燃料サイクル分析評価手法の調査（1994），新エネルギー・産業技術開発機構。
- 6) 赤井誠，野村昇，山下巖；エネルギー収支分析に基づく再生可能エネルギー利用技術の評価，日本機械学会論文集 59巻，565号B編（1993），2681-2688。
- 7) 化学工学会第1種研究会「CO<sub>2</sub>と地球環境問題研究会」；太陽光発電技術の評価（1993），化学工学会。
- 8) 稲葉敦，他10名；太陽光発電システムのエネルギー評価，化学工学会論文集，19巻，5号（1993），809-817。
- 9) 加藤和彦，他10名；太陽光発電システムの経済性評価，化学工学会論文集，20巻，2号（1993），261-267。
- 10) 野村昇，他4名；産業連関表を用いた太陽光発電システムのエネルギーベイクバックタイムの見積り，エネルギー・資源，16巻，53号（1995），517-524。
- 11) 資源調査会；資源・エネルギー面からの超電導技術に関する調査-超電導発電機を中心として（1987），科学技術庁。