

廃棄物のエネルギー・リサイクル

Energy Recycling of Solid Wastes

伊 東 慶 四 郎*

Keishiro Ito

1. はじめに

産業系も含め、我が国でエネルギーリサイクル可能な可燃性不要物の潜在量は、概ね、我が国の一次エネルギー総需要の約5%、年間24MTOE（原油の熱量換算：百万トン）程度で、この内、6割が再生可能なバイオマス（古紙、廃材）、4割が石油起源のプラスチックである。

これらのマテリアル利用も含めたりサイクルのあり方やその位置づけは、廃棄物リサイクルに係わる今後の公共投資や産業基盤投資の動向を左右する重要な政策課題で、国際的にも大きな争点になってきている。

この争点の背景には、近年の欧州における都市廃棄物政策のパラダイム転換とドイツの特殊事情が、またダイオキシン問題など社会的合意の困難化と米国環境保護庁の時代を画するような行政的営為の成果が、さらに持続可能な経済社会建設の必要性和グローバルなエネルギー・環境問題の不確実性がある。

しかし、ゴミ発電等のエネルギーリサイクルに否定的な政策スタンスを取っている国は、EUでも特殊な国内事情を有するドイツのみである。特に米国は、数ヶ年にわたる総合的な政策検討過程を経てエネルギーリサイクルの推進にも適した新たなガイドラインを確立している。一方、我が国では、グローバルな環境政策面からみて不可欠なエネルギーリサイクルの制度的位置づけ問題が、狭義の廃棄物政策の土俵の中で、これまでの所、看過されたまま推移してきている。

このため、本稿では、まず焼却施設公害防止対策の経緯、米国EPAの行政的営為の成果、EUのリサイクル政策の現状を紹介した後、我が国のエネルギーリサイクルの制度的位置づけに言及する。続いて、国際的なゴミ発電の現状と効率改善の可能性を明らかにし、

将来の技術的選択肢を紹介した後、今後のエネルギーリサイクル政策面からみた課題に言及する。

2. 歴史的転換期に入った公害防止対策

都市ごみ焼却施設は、様々な可燃性不要物を混合焼却する関係上、その処理過程で、媒塵、酸性ガス（SO_x、HCl、NO_x）、有機塩素系化合物（Dioxin、Furan）が生成し、燃焼ガスや飛灰中等には重金属（Pb、Cd、Hg）もかなり含まれている。都市廃棄物行政は、時代とともに次第に顕在化してきたこれらの公害防止ニーズに対する絶え間ない技術革新に追われてきた。

我国の都市廃棄物政策を振り返ってみると、戦後の復興期から高度成長期にいたる約20年間は、ごみの街角からの速やかな除去とその処分など「公衆衛生の確保」にその重点がおかれていた。しかし、高度経済成長に伴い公害問題が全国的に顕在化し、適性処理困難廃棄物が急増し始めた1960年代後半以降は、ばい塵除去対策から酸性ガス・重金属対策へ、さらにダイオキシン対策へと「都市公害防止対策」の絶えざる高度化の時代へと移行し、すでに30年近くの年月を経てきている。

☆S-I；1960年代—《公衆衛生の確保＋ばい塵除去対策高度化時代；遠心分離から電気集塵に転換》

☆S-II；1970年代～1980年代半ば—《S-I＋酸性ガス／重金属対策の時代；低NO_x燃焼と電気集塵にアルカリ洗煙処理を追加》

☆S-III；1980年代半ば以降—《S-II＋ダイオキシン対策の時代；電気集塵＋アルカリ洗煙から、高温安定燃焼＋乾式反応ろ過＋触媒脱硝に転換》

これらの長期にわたった公害防止の技術革新努力により、現在では、高温安定燃焼、乾式低温反応濾過及び、触媒脱硝を併用したシステムを採用すれば、ほぼ問題のない対応が可能であることが国際的に実証され認知されるにいたった。特に、米国環境保護庁が総合的な政策検討結果を踏まえて打ち出した新たな規制措

*（財）政策科学研究所 主席研究員

エネルギー・廃棄物政策担当

〒100 東京都千代田区永田町2-4-11

置を契機にして、世界の都市ごみ焼却施設の公害防止対策は、その「世界標準」の確立に向け、歴史的な転換期に入ってきたものといえる。

3. EPAの新たな規制措置と国際的意義

米国環境保護庁（EPA）は、一昨年、都市ゴミ焼却炉の総合的な公害防止対策の確立を目指して、新排出源達成基準（NSPS；NEW SOURCE PERFORMANCE STANDARDS、施行；1995年9月）及び2,000頁に及ぶ「ダイオキシン調査報告書」を、それぞれ公聴及び公開データ収集用に公表した。

この内、新排出源達成基準は、1990年の修正クリーン・エア・アクト以後実施されてきた国際的な実証試験結果を踏まえ、旧基準を大幅に修正強化したもので、全米の施設規模35トン/日以上の新設焼却施設に対して、ダイオキシン $0.20\text{ng}/\text{Nm}^3\text{TEQ}^*$ （削減率99%、都の指導基準の約1/4）、水銀 $0.080\text{mg}/\text{Nm}^3$ （削減率85%、同基準とほぼ同じ）、塩化水素 25PPM（削減率95%、同基準とほぼ同じ）等の厳しい排出基準（ O_2 7%基準）の達成を義務付けた。

このEPAの新たな規制措置で特に注目すべき点は、第1に、この新基準が、「高温安定燃焼＋乾式低温反応濾過＋脱硝」というエネルギー効率にも優れた排ガスの乾式処理システムで達成可能なことを、欧米諸国の国際的な共同実証試験により裏付けた上で公布されたこと。

第2に、医学博士であるEPA補佐官（Lynn Goldman）が、「この規制措置により都市ゴミ焼却炉の環境負荷が劇的に削減されるため、今後規制を強化する必要はない」と、さらにダイオキシンについては、「今後全米に6,000基近く存在する医療施設系簡易焼却炉等の規制に重点を移行させる」と公けに表明した点にある。これらEPAの行政努力は、世界の焼却施設の公害防止対策が、長期にわたった技術開発や環境・健康影響の評価段階から、エネルギーリサイクルの推進にも適した高度環境規制適合型「世界標準」の確立段階に入ってきたことを示す歴史的エポックとして評価される。

4. EUにおけるエネルギーリサイクル政策

EU（ヨーロッパ連合）は、1994年12月末、「包装材や包装廃棄物に関する欧州議会及び閣僚理事会指令」

（以下「指令」という）を施行した。

この指令では、その前文において「廃棄物の削減が持続可能な経済成長にとって不可欠である」と指摘した上で、その制定目的を「包装廃棄物の処理が環境に及ぼす影響を防止し、域内の市場機能の確立と貿易障壁や競争制限の排除に資するため、各国の制度的方策の調和を図る」点においている。また、これらの目的達成上の最優先方策に「包装廃棄物の発生防止」を、補完的な基本原則に「包装材の再使用、包装廃棄物のリサイクルやその他の再資源化及びこれらによる最終処分負荷の削減」を掲げている。

この指令では、リサイクルにメタン化等の燃料化も含め、エネルギーリカバリーは熱回収を伴った従来型の直接混合焼却に限定し、再資源化（リカバリー）はこれら両者を含むものと定義した上で、加盟国に、「2001年6月までに包装廃棄物総重量の50～65%を再資源化（エネルギーリカバリーを含む）し、またこの目標以内で同総重量の25～45%（どんな素材も最低15%以上；プラスチックを想定）をリサイクルすること」を義務付けた。さらに、ここでの「上限目標を越える方策には、当該国が当該目標に対応したリサイクルや再資源化能力を有し、域内の市場の攪乱や他の加盟国の目標達成を阻害しないこと」など、厳しい制限条件を付した。

これらEUのターゲット規定で注目すべき点は、生産・流通系も含めた可燃性包装廃棄物全体の4割近くを事実上エネルギーリカバリーするよう義務付けたこと、また、その他の可燃性包装廃棄物も地方都市等では、その多くを単純焼却したり埋立処分せざるをえない現実をも明確に認識し無理のない実効性のある目標設定を行った点である。

また、この指令の全文では、エネルギーリサイクルに係わる重要なポリシーが次のように表明されている。「再資源化プロセスに科学技術的な進歩が見られるまで、環境影響面からみて望ましい選択肢は再使用やリサイクルである」が、再使用、リサイクル、エネルギーリカバリー間の政策的優先順位の設定については、未だその根拠が乏しいため、できる限り速やかにライフサイクルアセスメント手法を整備し明確な判断を下すよう求めている。

これは、焼却施設の公害防止対策面での社会的合意形成の困難さや高コストな施設建設費の財政負担回避面から、EUでは当面、再使用やリサイクルを優先するが、プラスチックリサイクルの方法・範囲・コスト

註1) TEQ；toxic equivalency of 2,3,7,8-tetrachlorinated dibenzo-p-dioxin

面での諸課題，気候変動に関する政府間パネル（IPC C）における世界の主要エネルギー源の一つとしてのバイオマスの位置づけ，及び米国EPAの明確なエネルギーリサイクル容認政策等を勧奨し，今後の見直しにも充分含みをもたせたものといえる。

5. 我が国のエネルギーリサイクル推進体制の整備

1987年の環境と開発に関する国連の世界委員会「OUR COMMON FUTURE」発表以後，1988年の気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の設置，1990年サミットにおける温暖化防止やオゾン層保護等への取り組み，1992年の国連の地球環境サミット，1994年の気候変動枠組条約の発効など，グローバルな環境問題への国際的な対応枠組みが異例な程，速やかに整備されてきた。

特に，ここ数年，IPCCでは，地球温暖化防止面から，西暦2100年を見通した世界エネルギーシナリオの検討を進めてきているが，この中で21世紀半ば以降の一次エネルギー需要の相当部分をバイオマス（太陽エネルギーの蓄積体）で供給するケースを重視している。これは，バイオマスが過半を占める可燃ごみのエネルギーリサイクルが，グローバルな環境・エネルギー政策とも整合の取れた施策であることを明確に示している。

我国でも，このような動向を踏まえ，「地球温暖化防止行動計画」が1990年に閣議決定され，都市ごみ焼却熱を活用したゴミ発電や熱供給は，紙・缶・瓶等のリサイクルの促進等とともに，二酸化炭素やメタン（埋立地生成ガス）等の温室効果ガス排出抑制対策の一つに位置づけられた。

これら内外の動向は，我が国の都市廃棄物政策が，従来の「公衆衛生の確保や都市公害の防止」段階から，廃棄物の発生の抑制や素材リサイクルの他，エネルギーリサイクルにも充分配慮した「地球的規模の環境保全」（CO₂，CH₄の低減化）の段階へと，その政策理念を大きく転換すべき時代に入ったことを明確に示している。

しかし，我が国では，素材リサイクルは産業界や関係省庁の営々とした努力により，世界的にもすでに高度の水準に達してきているが，エネルギーリサイクルについては欧米に比べ著しく立ち遅れ，清掃工場の発電量統計すら整備されていないのが現状である。

この主な原因は，基本法である廃棄物処理法及び同法を受けた自治体の条例や政策において，エネルギーリサイクルが制度的に位置づけられておらず，その推

進体制の整備の必要性が見過ごされたまま推移してきた点にある。このような現状を改善するためには，国際的にも旧態然たる廃棄物処理法を抜本的に改正し，エネルギーリサイクルの制度的位置づけを明確にするとともに，広域的な共同事業化，企業会計の導入，民間への委託処理等の事業化方式の多様化やインセンティブの付与，さらに所要の行政機構改革にも充分配慮した制度的枠組みの整備を急ぐ必要がある。

6. ゴミ発電の現状と効率改善の可能性

以下本項では，現状における主たるエネルギーリサイクル形態である混合ごみ直接焼却型ゴミ発電の国際的現状や，我が国における効率改善の可能性と経済効果に関するシミュレーション結果の概要を紹介する。

6.1 国際的にみたゴミ発電の現状

欧州，特に西独では，1960年代半ば頃から主蒸気温度450～500℃クラスのゴミ発電が普及し始めたが，ボイラの水管壁や過熱器の高温腐食にやられ，1970年代半ば以降は350～450℃域に主蒸気温度を低下させ，かつボイラ設計の改善や水管壁の保護など種々の改善方を講じてきている。

米国では1970年代にゴミ発電が開始されたが，高効率化が図られ始めたのは，1978年のPUBLIC UTILITY REGULATORY POLICIES ACT（PURPA法）によってゴミ発電の経済性が高まってからである。

当初は高温腐食トラブルがかなり発生したが，欧州の技術導入や自主改良を積み重ね，現在では443℃を上限温度とした高効率プラントが数多く建設され，その発電端効率は，すでに26～28%（LHV）程度に達している。これらの効率は，筆者の種々の効率改善手段やヒートサイクル解析の経験からみて，すでにゴミ発電の実用的な限界効率に近づいている。

なお，これらの発電端効率は，蒸気温度の高さのみでなく，ボイラ出口ガスO₂濃度7%台，排ガス温度177℃，再生サイクルの3段化，排気真空度0.086ata（湿式冷却塔使用），乾式低温反応濾過方式（湿式洗煙なし）による排ガス処理，脱硝・白煙防止用再加熱無し等の条件（例示）のもとで，始めて達成可能になっている点に充分留意する必要がある。

一方，我国では1965年に蒸気温度345℃のプラントが大阪市で稼働したが，短期間に大きな腐食が生じたため，以後20年余の長きにわたって，蒸気温度は200～300℃に抑制され，発電端効率も高々10～15%程度にとどまったまま推移してきた。しかし，我が国でも

前述の地球温暖化防止行動計画の閣議決定や関係省庁のゴミ発電高効率化への取り組み、売電料金の見直し等を契機にして、蒸気温度380℃クラス、発電端効率約20%のプラントが計画され、昨年越谷市で運開するにいたった。

6.2 ゴミ発電の効率改善の可能性と経済効果

ゴミ発電の効率改善にあたっては、表1に示すように様々な手段があり、これらの手段をいかに組み合わせ適用していくかが、ゴミ発電所計画上の重要な課題となる。しかし、これらの計画検討にあたっては、膨大なケースのヒートバランスのシミュレーションや総合的な技術経済評価を行う必要が生ずるが、このような評価作業を各自治体が独自に行うのは不可能に近い。このため、国または各自治体が共同して、これらのシミュレーションや総合的な評価作業を数ヶ年にわたって行い、「ゴミ発電効率改善ガイドライン」として取りまとめていくことが望まれる。

ここでは、東京都の要請で筆者が2ヶ年にわたって実施したゴミ発電の効率改善方策に関する総合研究結果等に基づき、今後のゴミ発電高効率化の可能性と限界やその経済性に関する知見を紹介する。

(a) 都市ごみの焼却プラントでは、450℃前後から塩化物や硫酸塩等のアルカリ塩による高温腐食が進行し始め、500℃前後で同腐食の第1ピークに遭遇すると指摘されている。このため、安定運用面からみた主蒸気の実用的な過熱限界は、米国で実績が積み重ねられつつある440℃前後であると考えられる。

(b) ゴミ発電で達成可能な発電端効率は、最新のダイオキシン・NOx 総量規制適合システム（高温安定

燃焼+乾式低温反応濾過+触媒脱硝）のもとで、かつタービン排気真空度0.10ata の場合、施設規模・空気比・復水方式・蒸気過熱度・ヒートサイクルの構成形態等で若干異なるが、中～大型プラントでは25～27%（LHV）程度、送電端では19～22%程度である。この値は、最新の越谷市のプラントよりも、さらに3割近い効率の向上が可能なことを示している。

ここでは参考のため、蒸気温度300℃&400℃ケースで、種々の改善手段を段階的に講じた場合、どの程度の効率改善が期待できるか、シミュレートした結果を図-1に示す。

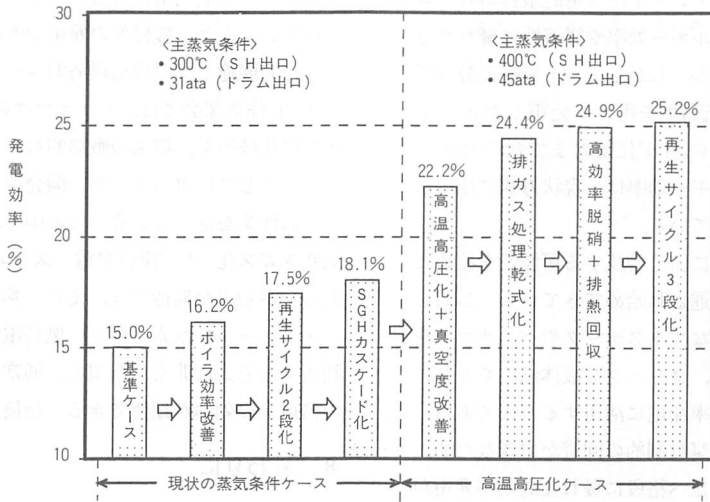
(c) 我が国における近年のごみ発電高効率化は、主蒸気の高温化や化石燃料併用方策に重点をおいて進められてきた。しかし、本調査結果によれば、従来の主蒸気温度300℃時の発電効率15.0%から、同400℃時の25.2%にいたる効率改善比率68%（効率アップ10.2%）の内、高温化による改善効果は3割以下であること。

また、その他の7割以上の効率改善効果は、ボイラ出口ガス温度の低減化、排気真空度の改善、再生サイクル化、排ガス処理の乾式化など、高温腐食問題とは余り係わりのないシステムの地道な一般改善対策の積み上げによることが明かとなった。

(d) NEDOの調査でも、主蒸気温度を300℃から500℃に改善しても、その効率改善比率は35%程度（300℃基準比）である。また、ガスタービンとの複合化を図ってもその効率改善効果は400℃前後の高温化とほぼ同程度である。このため、今後のゴミ発電の効率改善にあたっては、主蒸気の高温化や化石燃料併用方式と同程度かそれ以上に、上記の一般的な効率改善対策

表1 ゴミ発電の効率改善手段

プラントシステムの改善	1. ボイラ効率の改善	・排ガス温度の低減化 ・燃焼空気比の低減化
	2. 排ガス再加熱のカスケード化（2段加熱化）	
	3. 排ガス処理の乾式化（排ガス再加熱用蒸気の低減化）	
	4. 高温高効率脱硝後の排熱回収	
発電サイクルの改善	5. 主蒸気の高温・高圧化	
	6. タービン排気真空度の改善	
	7. 再生サイクル化	・ボイラ給水加熱の再生化 ・燃焼空気余熱の再生化
	8. 再熱サイクル化	・湿分離方式 ・湿分離再熱方式 ・分岐主蒸気による再熱方式 ・ボイラの再熱化方式
化石燃料を併用した高温化	9. ガスタービンの高温排ガスによる2段過熱方式	
	10. 独立過熱器による2段過熱方式	



注1) 燃料廃ガスの酸素濃度；ボイラ出口にて10.0%（乾基準）ベース
 2) タービンの定格蒸気流量；基準ごみ（2,400Kcal/kg）・炉負荷率100%時の1.20倍

図-1 段階的効率改善見通し（施設規模；1,200 t/日）

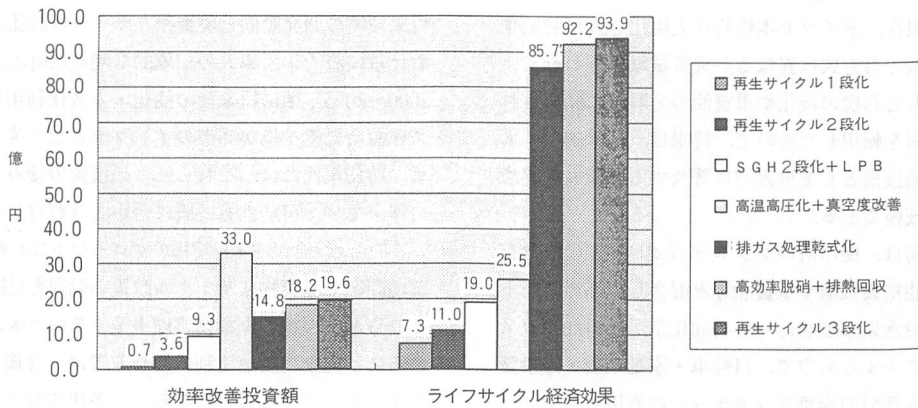


図-2 段階的効率改善投資とライフサイクル経済効果（施設規模；1,200 t/日）

の推進に努める必要がある。

(e) ボイラ効率の改善，再生サイクル化，排ガス処理の乾式化，主蒸気の高温化と排気真空度の向上等の効率改善方策は，全体として優れた経済効果が期待できる（図-2）。特に，主蒸気の高温化を前提とした排ガス処理の乾式化ケースでは，発電効率の向上や所内電力の低減化により売電収入が大幅に増加するのみならず，プラント建設費や運転維持管理費の大幅な節減も可能になるため，優れた正味経済効果が期待できる。

また，ボイラの高圧化効果を活用した脱硝装置入口ガス再加熱温度の改善は，脱硝効率の改善，高価な触媒の節減，触媒寿命の延伸等にもかなり役立つ。

(f) 厳しい高温腐食制約下での安定運用上の上限温

度（440°C）前後の高温化方策と，380～400°C程度の適度の高温化に湿分離サイクルを組み合わせた方策とは，ほぼ同程度の性能を發揮すると見込まれる。この後者のケースは，本調査の過程で始めて明らかになってきたゴミ発電固有のヒートサイクルで，安定運用性に優れているため，今後，本格的な検討を深めていくことが望まれる。

7. エネルギーリサイクルの将来的選択肢

近年，可燃ごみ有効利用上の選択肢を広げる方策として，ゴミを破碎選別した上，生石灰と混練し成型化するRDF化技術が実用化導入され始めてきている。この可燃ゴミのRDF化は，複雑かつ高コストな前処

理を必要とするが、セメント生産（量的限界あり）等の特定の分野ではエネルギー効率や経済性に優れた方式として評価されている。しかし、ゴミ発電の分野では、RDF化し改良型流動炉を用いて発電したとしても、生石灰生産用燃料やRDF化動力まで含めたトータルシステムのエネルギー効率は、現状方式に比べ余り優れないと指摘されている。

これに対し、21世紀に広く普及する可能性を秘めた未来型技術の開発が推進され始めてきている。これは、選別排出が比較的容易なプラスチックやバイオマスを選択的に回収し、一旦、クリーンな液体燃料やガスに燃料転換した後、高効率発電に活用する技術である。この技術の場合は高温腐食制約の回避が可能のため、現状の直接焼却発電に比べ格段に優れた高効率発電が可能となる。これら技術の概要を以下に示す。

7.1 プラスチックの油化・ガス化技術

これらの技術は、廃棄プラスチックの手選別が不用で、かつ再生品が汎用的に利用できるリサイクル技術として、現在、ドイツで本格的な実用化導入が開始され、我が国でも方式は異なるが実証試験が行われている。もともと石炭の液化や重質油の分解用に開発されてきた技術を転用したもので、将来は、基幹的なエネルギー供給技術として世界的に普及する可能性を秘めた戦略的技術である。

この技術は、使用済みプラスチック（PVCの含有可）を石油精製残渣や重質油等と混合し、高温高圧下で熱分解や水素添加を行い、石油化学用原料油やガスにリサイクルするもので、自動車・家電機器・建設資材系等の大部分の廃棄プラスチックに適用可能で、かつ大規模化にも適しているため、将来の基幹的なリサイクル技術として注目されている。

再生品の油やガスは、塩素・硫黄・窒素等が除去されているため、クリーンな燃料としてガスタービン（GT）複合発電にも利用することができる。油化やガス化の総合効率を仮に88%、近い将来の事業用複合発電の送電端効率を57%（LHV）とすると、システムの総合効率は50%に達する。これは、通常のゴミ発電で達成可能な限界効率の2倍以上に相当する驚くべき値であり、高度要素技術のネットワーク化により、社会全体としてのエネルギー効率を大きく改善できる可能性を秘めた典型例ともいえる事例である。

7.2 バイオマスのガス化・燃料化技術

古紙や廃木材を含めバイオマスは、再生産可能な太陽エネルギーのストック型資源で、供給ポテンシャル

が大きく、分散利用にも適し、そのコストも極端に高くはない。また、農村部の雇用や所得の確保にも役立つなど発展途上国の政治経済的ニーズにも適している。

IPCC作業部会では、バイオマスのガス化技術や液体燃料化技術を、将来の戦略的なエネルギー供給技術の一つとして位置づけ、その開発導入の効果やコストの評価作業を進めている。この中で、バイオマスの空気吹きガス化/GT複合発電システムの場合、40~45%の発電効率が期待でき、また、熱化学的ガス化方式でメタノールや水素を作り、燃料電池発電式自動車で利用する方式は非常に有望で、通常の内燃機関自動車の倍以上の効率が期待できると指摘している。

8. おわりに

エネルギーリサイクル政策の今後の展開は、世界のエネルギー需給の動向から考えて、ここ10~20年程の期間は、制度的枠組みの整備と現状のゴミ発電の高効率化の推進に重点をおくのが適切であろう。しかし、将来技術の開発動向と廃棄物リサイクル政策の分野における経済的手段導入の国際的な潮流如何によっては、2000~2005年頃に将来型の油化・ガス化利用技術やガス化複合発電技術が都市のインフラとして導入され始め、2010年代には、これら三つの技術の棲み分け時代に移っていく可能性も一概に否定しきれない。

このため、今後四半世紀程のグローバルなエネルギー・環境問題や廃棄物リサイクル政策の動向を見据えつつ、これらが、現状の廃棄物処理事業やそのマネジメント、さらには廃棄物関連法制のあり方等に、今後いかなる変革を迫ってくることになるか、多角的なシナリオ分析を行うことにより、政策的な選択肢の概念設計とその検討を深めていく必要が生じてきている。

参考文献

- 1) U.S.Environmental Protection Agency, "New Municipal Waste Combustors ---Proposed Subpart Eb NSPS", Sep. 1994
- 2) 折田寛彦, 「海外におけるゴミ発電の状況」, 『廃棄物学会誌』, Vol. 6 No. 3 1995
- 3) 山田貞裕, 「米国における高効率大容量ゴミ焼却発電実施例」, JSWM学会論文集, 1993
- 4) 東京都清掃局, 「清掃工場余熱利用推進調査(その3)」, 1992
- 5) 東京都清掃局, 「清掃工場余熱利用推進調査(その4)」, 1993
- 6) IPCC Working Group II a, "Energy Supply Mitigation Options", 10. Feb. 1995
- 7) Dr. Rolf Holighaus etc, "Feedstock Recycling of Plastics by Hydrogenation", VEBA OEL AG