

# 未利用エネルギーの活用技術とその課題

Present Status & Future Prospect of Unexploited Energy Utilization Technology

柏 木 孝 夫\*

Takao Kashiwagi

## 1. はじめに

エネルギー問題を語る時、常に引用される枕詞として、「わが国のようにエネルギー資源の乏しい国は貴重なエネルギーを大切に、常に省エネルギー意識を維持し続けなければならない」がよく使われるが、最近では単に言葉だけで終わってしまっている感も否めない。その証拠に1988年以降、アメニティ志向の高まりから、エネルギー消費が大幅に増大してしまっている。一方において、地球規模での環境問題が、国際政治の場で極めて大きな課題となっており、本年6月にブラジルで開催される「地球環境サミット」で温暖化防止に対する枠組み条約の締結に向けて政府間調整が精力的に行われている。我国でも逸早く1990年末に温暖化防止行動計画を策定し、国際的に高い評価を得たことは記憶に新しい。

さて、これら国際的諸情勢を踏まえると、今まさに再度上記の枕詞を真剣にうけとめ、わが国におけるこれからのエネルギーシステムや合理的なエネルギーの利用技術について原点から再考する必要性が出てきた。

この原点とは何であろうか。答えは安易に得られ、わが国におけるエネルギー消費ミナムを達成することにある。但し、これまでのようにエネルギーコストを最小にするという単純な問題ではなく自然環境や地球環境への影響を考慮に入れなければならないところに、これまででない困難な課題が含まれている。そのためには、エネルギー供給、需要の両側面から合理的なエネルギーの利用体制や社会構造を強力に推進する必要がある従来のように断熱や個々の省エネルギー機器の開発に主点を置いていた時代から、大きなフレームにより、システムとしての省エネルギーを考える新エネルギー時代の到来といえる。このキーシステムとして未利用エネルギーの活用が注目されている。

## 2. システムとしての省エネルギーと未利用エネルギー活用の意義

これまでの省エネルギーは保温や断熱を良くするとか、排熱ボイラーやヒートポンプのような高性能省エネルギー機器のように、個々の要素技術の効率向上に目が向けられ、多大な成果をあげてきた。しかし、これからはこれらの高性能技術開発の成果を有機的に統合し合理的なエネルギー利用を一段大きい目標に設定することにより、省エネルギー自体をシステムとして機能させなければならない新しい局面を迎えた。さて、それには種々の方策が考えられるが、工学的観点から考えると、多角的にエネルギーの利用形態を合理化し、熱利用、動力回収などを含め、エクセルギー（有効エネルギー）を徹底して活用するシステムを構築することを意味する。現在注目されている代表的な合理化システムとして、①未利用エネルギーの活用システム②熱のカスケード利用システム③コージェネレーションシステム④複合エネルギー利用システム⑤資源等リサイクルシステムがあげられる。筆者は上記①～④をさらに系統的に融合させ、大規模集中型発電所から高効率供給される安定電力と相補的に併用することにより、熱、電力、動力に代表される主要エネルギー形態に対するわが国の究極の合理的エネルギーシステムを構築できることになると考えている。特に②、③は双方共、中低温排熱の有効利用体制なしには有効に機能しないため、①と密接に結びついており、未利用エネルギーの活用システムは社会性が高く、長期的な視点からその意義は極めて大きい。

さて、未利用エネルギーの活用システムは今後どのように進展させるべきであろうか。次章以下わが国における都市部並びに産業部門の未利用エネルギー活用について展望したい。

\* 東京農工大学工学部機械システム工学科教授

〒184 小金井市中町2-24-16

表1 都市部での利用可能なヒートポンプ熱源

○印は現在積極的に利用されているものを示す

名称	利用	将来性	注
自然系			
大気	○		現在大々の利用
太陽熱		○	補助的利用が中心
地下水		×	地盤問題多い
河川水	△	○	熱量多い
湖水		×	環境問題有り
海水		○	ウォーターフロント計画
地熱			地理的に遠い
温水			地理的に遠い
都市部			
清掃工事	○		相当進んで要る
下水処理場	△	○	諸外国での例多い
火力発電所		○	地理的に遠い
変電所	△	○	中温レベル
地下送電ケーブル	△	○	広域の利用
地下街		○	補助的利用
地下鉄	△	○	パイプライン敷設安易
コンピュータセンタ		○	絶縁性搬送媒体
冷蔵倉庫		○	中温レベル
L N G		○	冷熱量多い

表2 東京都23区の熱需要

(単位：Tcal/年)

	冷熱需要	暖房・給湯需要	合計
業務用	9,465	10,609	20,074
家庭用	1,324	22,993	24,317
民生用合計	10,789	33,602	44,391

表3 東京都23区の未利用エネルギー存状況

<高温排熱例> (単位：Tcal/年)

ごみ焼却場	約4,000
-------	--------

<低温排熱例> (単位：Tcal/年)

下水処理場	発電所・変電所・送電線	地下鉄	河川水	海水
約8,000	約2,000	約1,000	約28,000	無限

3. 都市部の未利用エネルギーの活用と推進方策

熱供給は遠距離への搬送が困難であることから、近距離内で十分な熱需要が存在する地域を対象にすることが望ましく、この観点からエネルギー需要密度の高い都市部に重点をあてられる。特に最近ではアメニティ志向の高揚から、これら都市部を中心に民生用の冷暖房、給湯といった熱需要が急速に増大し、中低温の未利用エネルギーの合理的利用が極めて重要となってきた。

通常の熱供給は、高温でかつ蒸気のように潜熱性媒体の方が利用範囲が広がり望ましいことは言うまでもない。しかし、見方をかえて民生用熱需要に着目すると、大半が100℃以下の中低温レベルでまかなうことができる。さらに、ムーンライト計画で精力的な開発が行われているスーパーヒートポンプや吸収ヒートポンプを駆使すれば、未利用エネルギーの対象温度範囲

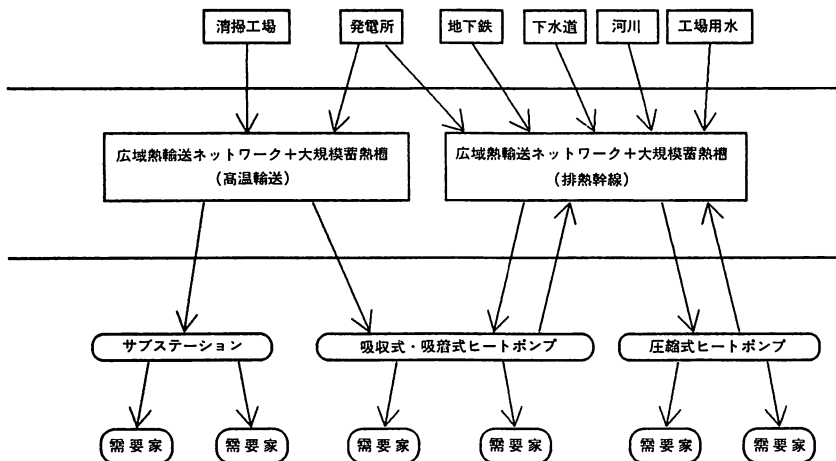


図-1 未利用エネルギー活用システム概念図

表4 未利用エネルギー活用システムの技術的課題

主要技術項目	対応技術・要素	今後の開発課題	備考
排熱回収技術	○小温度差熱交換技術 ・プレート型熱交換器 ・伝熱促進技術	○高性能プレートフィン型熱交換器 ○ステンレス、セラミック、ガラス製 又は、耐腐食材のコーティング技術 ○メンテナンスフリー化クリーニング技術	○量産化による低コスト化
	○耐腐食性材料		
蓄熱技術	○温度レベル別最適蓄熱システム（主に顕熱蓄熱） ・冷水蓄熱（5～10℃） ・未利用熱源水蓄熱（10～45℃） ・温水蓄熱（45～50℃）	○大規模蓄熱槽の開発 熱回収率40～90%以上	○地下水、岩石など自然環境の利用も可能
	○潜熱蓄熱 ・水蓄熱（0℃） ・各種PCM蓄熱（-10～80℃）	○低熱抵抗低減化の技術開発 ・直接接触型（スラリー状の水形成） ・過冷却応用型 ・クラスレート型（融解温度7℃）	○蓄熱密度大 ○一定温度蓄熱可能
	○ケミカル蓄熱 ・高温蓄熱（出力温度80～200℃） ・低温蓄熱（ “ 10℃以下）	○広い温度範囲で反応可能な媒体の選定 ・アンモニアの利用 ○高性能大規模反応器	○開発途上技術
ヒートポンプ・冷凍技術	○圧縮式ヒートポンプ・冷凍機 ・圧縮機技術 ・新 작동媒体（非共沸混合冷媒）	○高効率化・高昇温化 ・COP 3～5以上 ○代替フロン冷媒開発	○小型化容易 ○メンテナンス容易 ○信頼性大
	○吸収式ヒートポンプ・冷凍機 ・アドバンスサイクル ・圧縮・吸収ハイブリッドサイクル ・新 작동媒体	○高効率化・高昇温化 ・COP:暖房2～3以上 冷房0.6～2以上 ○アドバンスサイクルの実証 ・GAX, デュアル, トリプル他 ○低温駆動化とアンモニア冷媒の再実用化	○未利用熱エネルギーの直接駆動可能 ○非フロン系として最も優位
	○吸着式ヒートポンプ：冷凍機 ・高性能反応器 ・新吸着剤 ・新サイクル	○高効率化 ・COP：（冷房0.6～0.8以上） ・反応器内伝熱促進技術 ○連続式サイクルの開発	○吸収式に比べより低温熱源の直接駆動可能 ○小型化・軽量化が課題
配管敷設技術	○新配管工事手法 ・シールド工法トンネル方式 ○耐腐食性配管材料 ・コンクリート製トンネル他	○配管敷設の低コスト化 ○蓄熱性の良好な耐腐食性配管材料	○都市部では数十万～数百万円/m

も広がり、河川水や海水のように環境温度レベルに極めて近いものまで汲み上げ熱源や冷却熱源として有効に利用できることになる。

このように都市部における未利用エネルギー活用の合理性についてそのポイントを簡単に述べたが、ここで、これら未利用エネルギーの中で現在話題になっている各種ヒートポンプの熱源として都市部で利用できるものについて考えてみたい。現在利用されている熱源も含めて筆者がまとめたものを表1に示す。この表では自然系と都市排熱系に大別して示したが、未利用のまま捨てられているエネルギー源がいかにも多岐にわたっているかをご理解いただけると思う。

さてここで、東京23区内における未利用エネルギー活用の効果について資源エネルギー庁公益事業部計画課が行った調査結果について紹介したい。表2、表3は、東京23区内の民生用熱需要と未利用エネルギーの賦存状況について、当課が試算した結果である。これらの表が示すごとく、熱需要量を十分上回る未利用エネルギー量が存在し、熱源の温度レベルや分布状態など種々の要素を勘案することにより、社会インフラとして未利用エネルギー活用システムが構築できれば、

エネルギー消費密度の高いわが国の都市部において多大な貢献をすることになる。

現在考えられている未利用エネルギー活用システム概念図を図-1に示す。このような熱供給体制を確立するために必要となる主要な条件として、以下の事項があげられているので、参考のために紹介しておく。

①前提条件として、ネットワークが有効となる程度に地域熱供給が一定地域内に普及していること、および各地域熱供給間で相当程度のネットワーク化が進んでいること、

②広域的な熱輸送パイプラインの敷設が社会資本の一部と位置付けられ、かつ熱の安定的・効率的供給が地方自治体の責務である、とのコンセンサスが得られること、

③個別冷暖房から未利用エネルギー活用システムへの切り替えに強制力を持たせることに対し、国民的コンセンサスが得られること。

さて、このように社会インフラとして未利用エネルギーのネットワーク化をはかるためには、解決すべき多くの課題があるが、表4に主要な技術課題に重点をあててまとめてみた。表4に示した技術課題は今後一層の

表5 エネルギー多消費4業種における未利用エネルギー 単位:Tcal

		紙・パルプ	化学工業	セメント	鉄鋼	合計	
エネルギーの 流れ	投入全エネルギー	99,770	363,710	61,235	423,552	948,267	
	未利用 エネルギー	活用見込有り	2,993		616	117,073	120,682
		活用見込無し	29,532	4,554	12,247	79,789	126,122
		合計	32,525	4,554	12,863	196,862	246,804

注1：未利用エネルギー量は、4業種ともモデル的な事例に基づき、通商産業省で全国ベースに引き直したものであり、それぞれのモデルの性格により未利用エネルギーの捉え方等、業種の整合性は必ずしも取れていない。

注2：化学工業については、供給先や経済等の条件が整ったとしても、ほとんど活用見込みなし。

注3：化学工業の未利用エネルギーについては、エチレン部門のみ。

注4：紙・パルプは、黒液の有効利用の拡大による試算

注5：鉄鋼は、「投入全エネルギー」「未利用エネルギー」ともに一貫製鉄所の事例に基づく業界試算を用いており、一貫製鉄所のみエネルギー。 出所：通産省調べ

開発を行わなければならないが、この他に標準化のための基準設定や、個々の要素技術の開発だけでなくシステム全体としての高効率化についても実証試験により把握しなければならない。特に前者の標準化に関しては、広くネットワーク化をはかる際、採取熱、排出熱の温度を揃える必要があり、組み合わせ機器の標準化を行うことにより、コストの低減につながり未利用エネルギー活用システムの普及促進に多大な貢献をすることになる。

#### 4. 産業部門の未利用エネルギー活用システム

わが国では、1970年代以降産業部門を中心にエネルギー原単位の低減を図るため、排熱の有効活用に対する積極的な設備投資を行い、多大な成果をあげてきた。その結果、現状では工場内で発生する蒸気、可燃性ガス、排熱等については、極力有効活用が図られ、エネルギー多消費4業種におけるエネルギー原単位の改善率を例にとると鉄鋼業で20%、石油化学工業で45%、製紙・パルプ工業で30%、セメント工業で32%にも及び、世界の工業国の中で省エネルギーに対して最も顕著な成果をあげた国であると言われている。

このように経済性のある省エネルギー活動はほぼ達成したといえるが、現在でも自工場内では経済的・技術的に活用し得ない比較的中・低温レベルのエネルギーが未利用となっており、それは莫大な量となっている。わが国のエネルギー事情の緩和を考えると全章で述べた都市部の未利用エネルギーの活用にもまして重要視されるべきである。全産業部門における未利用エネルギー量の正確な把握は極めて困難であるが、ここで通産省が上記エネルギー多消費4業種について相当の仮

定・前提のもとに推計した結果を表5に紹介したい。未利用エネルギーは約25万Tcal (Tcal=10<sup>9</sup>cal) あり、表2に示した東京23区全民生用熱需要の5倍にもなる。このうち経済性等の条件が整えば有効利用の見込みがあるエネルギー量は12万Tcalあり、未利用エネルギー量の約48%に相当する。

これからは単独に工場内では未利用となっているエネルギーをコンビナート内での他工場での利用、工場近隣の民生需要などに有効に活用できる社会システムを構築し、未利用エネルギーを新たなエネルギー源として商品化できれば、需給両者の経済的メリットの追求が期待できる。その結果、産業部門におけるエネルギー原単位の改善並びに民生部門での一次エネルギー消費の低減をもたらす、緊迫した石油需給関係を考え合わせるとその意義は極めて大きい。

さて、ここで産業部門における未利用エネルギー活用のための課題と対応策について考えてみると、以下の項目があげられる。

##### (1)経済性の課題

・初期投資が高い。(排エネルギー回収、貯蔵、搬送、利用設備等)

エネルギー価格が低く豊富にある現状においては、投資回収期間が長期化するため、コスト負担の軽減措置が必要(購入エネルギー価格との競争条件の整備)。

##### (2)需給の安定性の課題

・エネルギー供給源の不安定化と需給の時間的ミスマッチ。

工場の生産状況等により、量的、質的に変動するエネルギー源であること、およびエネルギー需給に時間的にミスマッチがあるため、補助エネルギー源の設置等

が必要であり、かつ、需要と供給について地域的組織化が必要。

(3)技術上の課題

・未利用となっているエネルギーは、中・低温である等利用しにくい状況にあるため、回収、貯蔵、輸送、利用の各面において、ヒートポンプ技術、保温技術、熱交換技術等の向上が必要。

(4)制度上の課題

・工場内で未利用となっているエネルギーを隣接する工場あるいは近隣の民生用需要に供給する場合には、エネルギーを輸送する形態によって、関連法規等の弾力的運用が必要。このように未利用エネルギーの活用には種々の課題があるが、現在、そのニーズの重要性からいくつかのプロジェクトを積極的に推進している、次章にむすびをかねてその現状を紹介したい。

5. 未利用エネルギー高度活用プロジェクトの推進 —— むすびにかえて ——

最後にむすびをかね、多様化する未利用エネルギーを効果的に活用できるプロジェクトとして電力需要の負荷平準化に対する技術開発プロジェクトと産民複合型地域開発プロジェクトに焦点をしばらく概説する。

5.1 未利用エネルギー活用負荷平準化冷暖房技術開発プロジェクト

現在、資源エネルギー庁公益事業部においては、都市部における未利用エネルギーの高度活用と電力負荷平準化に対する技術開発プロジェクトを精力的に検討を開始している。

地域熱供給システムは、大規模に温冷熱を製造する熱プラント、需要家に対して、熱を供給するための熱供給システム及び全体のシステムを最適に計画・運転するためのソフトウェアで構成される。それぞれの部

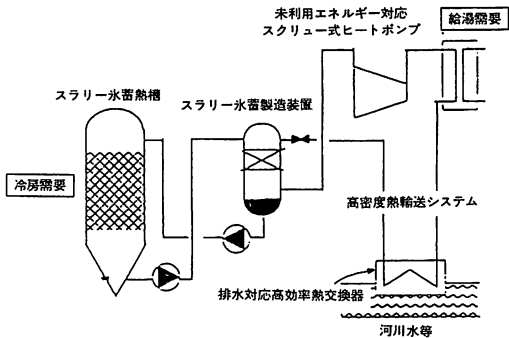


図-2 低温未利用エネルギー活用熱プラント

分における主要技術の内容及び課題について示す。

(1)未利用エネルギー活用熱供給プラントシステム

(a)低温未利用エネルギー活用熱プラント要素技術 (図-2参照)

・排水用高効率熱交換器

(下水処理水等の排水から高効率に熱交換するために連続的に汚物を除去できるストレーナの開発、間欠オゾンーションによる効率的な殺菌技術の開発、大規模用プレート型熱交換器の開発。)

・高密度熱輸送システム

(カプセル状の新型媒体の潜熱を利用した高密度熱輸送システムの開発、温度可変相変化媒体の開発、高密度熱交換技術、スラリー水のカプセル製造技術。)

・高効率スクリュウ式ヒートポンプシステム

(低温未利用エネルギーの昼夜間、季節間等における温度変化に対応でき、通年効率のよいヒートポンプシステムとしてSHPの成果であるスラスト相殺型スクリュウ式コンプレッサーや非共沸混合冷媒技術の多角的活用)

(b)高温未利用エネルギー活用熱プラント要素技術 (図-3参照)

従来より、蒸気タービン駆動ターボ式冷凍機の復水を利用するシステムは導入されているが、ゴミ焼却場におけるゴミ発電の廃蒸気等の低圧でかつ圧力変動がある蒸気を

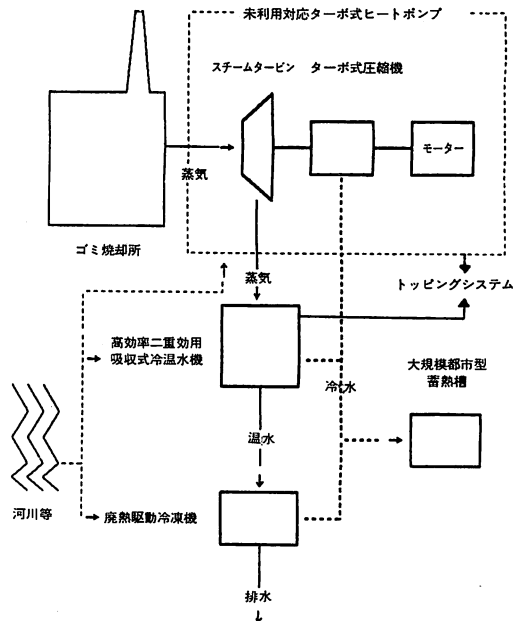


図-3 高温未利用エネルギー活用熱プラント

用いて、高効率運転が可能なタービン駆動ターボ式冷凍機と低圧蒸気で駆動する2重効用吸収式冷凍機を組み合わせたシステムを開発する。また、吸収式冷凍機については、冬場にヒートポンプとして利用するため、冬場の河川水等を熱源水として利用することが可能なヒートポンプの開発を併せて行う。更に、従来型のシ

ステムが需要側の負荷追従性に欠けていたところを、このシステムにおいては、あらたなシステム制御を行うことによって改良する。

(2)小流量高効率熱供給システム

現状の地域熱供給システムにおける需要家側への熱供給形態は、温水又は冷水の行き戻りの温度差を7度

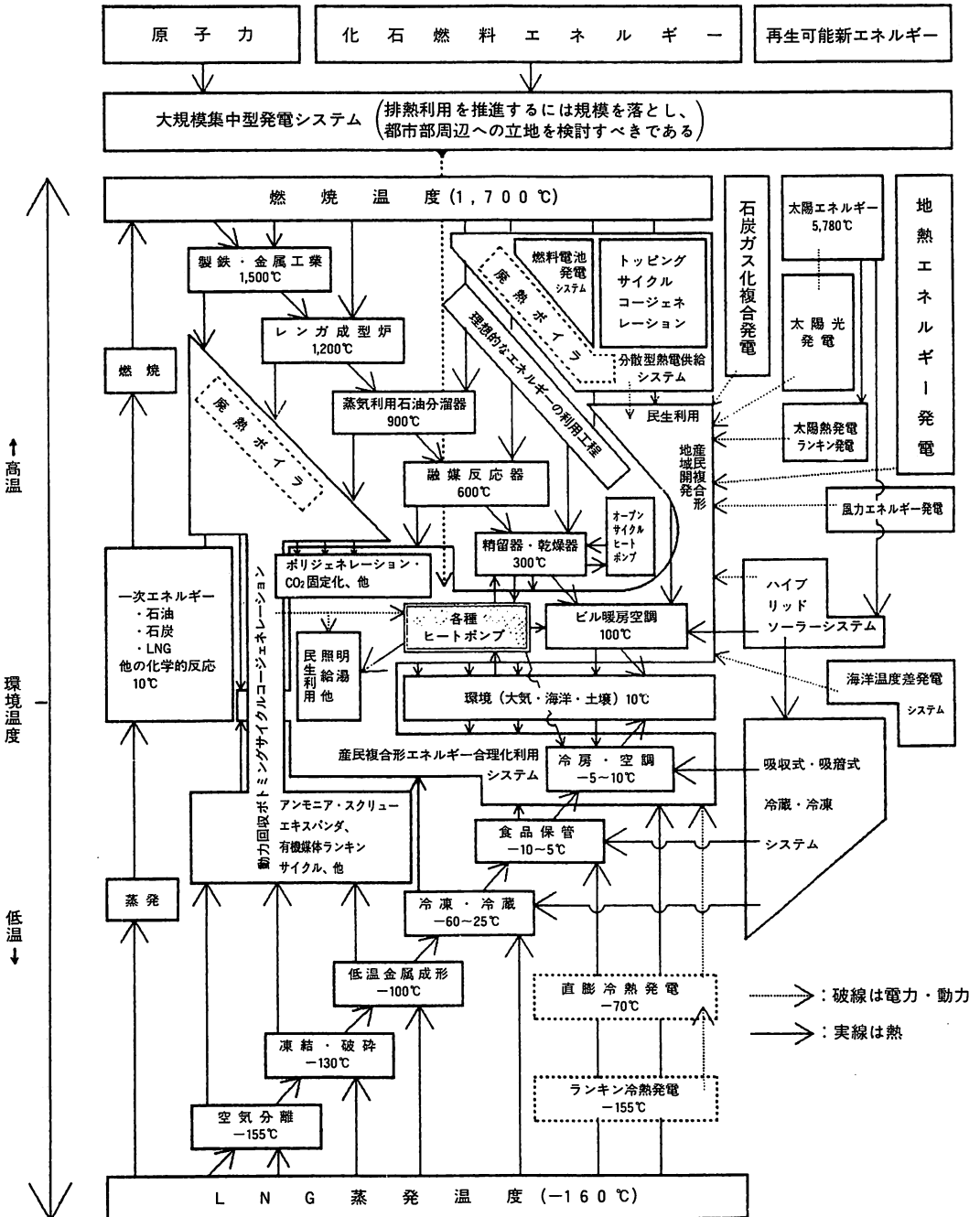


図-4 産民複合型エネルギーシステムの概要

程度としているが、この温度差を30度程度とすることによって、以下の抜本的な効率性の向上が図られる。

- ・同一熱量を供給するための水量が少なくなることによる送水ポンプ動力の節減
- ・ヒートポンプによって従来より低温から昇温することになることによる温度損失の減少

このような小流量で高効率な熱供給を実現するために熱供給の戻り温度差を大きくするための高性能ファンコイルの開発、需要家側の廃熱を回収するシステム、戻り配管の温度レベルに応じて、システム全体を最適運用するためのシステム制御技術等の開発を行う。

### (3)未利用エネルギー活用制御システム

未利用エネルギーを有効に活用し、電力負荷平準化に資する地域熱供給システムを構築するために必要となる最適設計プログラム、実際にプラントを最適運転するためのプログラムおよび最適性を検証するためのシミュレータの開発を行う。

## 5.2 未利用エネルギー活用産民複合型地域開発プロジェクト

未利用エネルギー活用システムについて再度強調したいことは、第3章、第4章で述べてきたように、民生利用に重点を置いた都市部における活用システムと工場等からの未利用排熱に重点を置いた産業部門における活用システムがあり、これらが有機的に結合することにより21世紀に向けて斬新かつ合理的なエネルギーシステムが構築されることになる。そして長期的視点に立ち、大きなフレームでこの合理化システムを推進すれば、わが国の一次エネルギー消費ミニマムに帰着する。

筆者は、これからの都市開発は各種交通網が放射状、円周状に整備されるようになって考えており、核都市群を中心に発展する産業部門からの排エネルギーを、うまくとり込んだ産民複合型地域開発の中で、これまで未利用であったエネルギーを自由に授受できるシステムを構築しなければならない。

この観点に立ち、筆者がまとめた産民複合型の合理的なエネルギー利用システムの概念を図-4に示す。この図には炭酸ガス低減に効果的なLNGの冷熱利用も含めて示したが、まず、熱エネルギーはカスケード利用すべきであることを強調したい。図の温度レベル別熱利用工程は単なる一例を示しただけであり、温度レベル幅は需要側の必要熱容量などを考慮に入れて決定

しなければならない。このような熱のカスケード利用システムは超省エネルギーシステムであることに異論はないと確信しているが、翻って現実に戻れば、必ずしも一連の熱プロセスが対象地域内に存在しない場合の方が多し。ここにコージェネレーションや各種蓄エネルギー技術を組み入れない限り、このシステムは効果的に機能しない。誤解のないように付記しておくが、図-4は、大規模集中型の発電所から送電されるベースロードとしての電力体系の上で成り立っていることは言うまでもない。今後の課題は、中低温の排熱を含めた未利用エネルギーをこのシステムの中でいかに有効利用できるかであり、ボトムリングサイクルコージェネレーションの開発にも主力を注ぐべきである。そして、燃料電池を含めてトッピングとボトムリングコージェネレーションをうまくシステムとして組み込み、図-4に示したように、異業種や地区の間で自由なエネルギー交流を可能とする「産民複合型」の地域開発体制の確立が強く望まれる。

さらに、将来的にはコージェネレーションから排出される炭酸ガスの固定化まで考慮にいれたポリジェネレーションシステムにまで発展させるシステムを構築できれば、省エネルギーだけでなく環境保全上もきわめて意義深い。炭酸ガス固定化技術としては、地球再生計画でも種々のシステムが提言されている。

いずれにせよ、システムとして機能させる時期に差し掛かったこれからの省エネルギーは、一産業内に留まることなく、複数の企業が相互利益を確保しつつ有機的に結合し、かつ、産民複合型の新しい地域開発プロジェクトを積極的に推進する中で、その真価を發揮し、環境性に優れた新地域でのエネルギー原単位ミニマムを明示してくれることになり、本稿で述べてきた未利用エネルギーの活用システムがこのキーポイントを握っている。

これからの合理的エネルギーシステムは短期から長期に到るまで達成目標を明確に定め、この目標を達成するためのシナリオを作成することから始まる。そのためには過去の規制にとらわれることなく、出来るだけ広い範囲内でのエネルギーフローをマクロ的に捉え、この流れの中で未利用エネルギーの合理化利用を検討しない限り、究極のエネルギーシステムは実現できないことを強調し、むすびとしたい。