

燃料電池の排熱利用技術

The Application of Waste Heat Recovery of Fuel Cells

真 壁 輝 男*

Teruo Makabe

1. ま え が き

燃料電池は排熱を利用しやすいので、発電と併せるとエネルギー利用効率を高めることができる、とよく言われる。そして外国では排熱利用を考慮した数10 kWの実験機も作られ、またわが国でも大型機を含め排熱利用の概念的な検討の例を見かける。

しかし、熱需要とのマッチングについて、需要パターンや温度レベル、熱供給設備の設計、経済性まで考えた適用検討はあまり行われていないように思う。

本稿では、燃料電池の排熱利用について具体的設計への足がかりを求めて行ったモデルシステムによるケーススタディーの一部を紹介しながら、今後の可能性を探ってみることにしたい。

2. 排熱利用の問題点

冒頭から水をさすようであるが、燃料電池の排熱利用は手離して期待できないことを述べる代りに、主な問題点をあげたい。

(1) 温度レベルの制約

リン酸型燃料電池は電池本体の運転温度が200℃程度であるので、蒸気を作れるような高い温度レベルの排熱が少なく、大部分は温水を作るレベルの排熱で、例えば地域熱供給に利用する場合、暖房・給湯にはよいが、冷房対応には利用効果が小さい。(次世代の熔融塩型では高い温度レベルの排熱を多く取出せる。)

(2) 排熱量の制約

排熱量は発電量にほぼ比例し、発電パターンと同じ排熱パターンとなるので、発電状態のいかに拘らず熱需要の変化に対応するためには、蓄熱槽やボイラが必要である。また、発電出力を下げると蒸気を作れるような高温排熱が次第に減少し50%出力以下ではほとんど望めない。

(3) 経済性

排熱を多少でも利用すればその分だけ燃料電池プラントに投入する燃料のエネルギー利用効率は向上する。しかし、燃料供給が安定している時代には経済性が重要である。要するに熱供給のために付加した諸設備の費用が回収できなければならない。

3. 燃料電池の排熱利用の位置づけ

燃料電池は発電を目的とした装置であるから、発電効率を重視し発電のみで十分実用になる機能を持たせることが必要である。

そして、発電に伴って発生する排熱は近くに適当な熱需要があれば、発電に支障をきたさない範囲で有効利用をはかる、というのが基本的な考え方であると思う。

その理由は、電気は質の高いエネルギーであるから発電効率や電力の需給バランスを重視すべきであること、熱需要だけのためならボイラなどより格段に高価な発電装置を消費させない方がよいこと、などである。

4. 燃料電池から出る排熱の量と温度レベル

現在の発電効率40~43%の水冷式リン酸型燃料電池発電プラントから出る排熱の量は、大雑把に言えば発電する電気の量とほぼ同じエネルギー量で、例えば1万kWの燃料電池プラントをフル出力で運転すると、およそ8.6 Gcal/Hの熱量が取出せる。もちろん電気に変る分以外は全部熱になるわけであるが、放散する分は別にして、プラント内の熱交換器から取出せる分という意味である。

発電効率を高めるシステムとするため、排熱はプラント内の数個所の熱交換器から取出す(見方を変えるとプラントを冷却する)のが一般であり、その温度レベルは200℃以下で、取出し箇所によって違う。

排熱量と温度レベルはプラントの設計によっても若干変り得るもので、図-1と表1に1万kW級プラント

*東京電力(株)技術開発研究所主任研究員

〒100 東京都千代田区千代田1-1-3

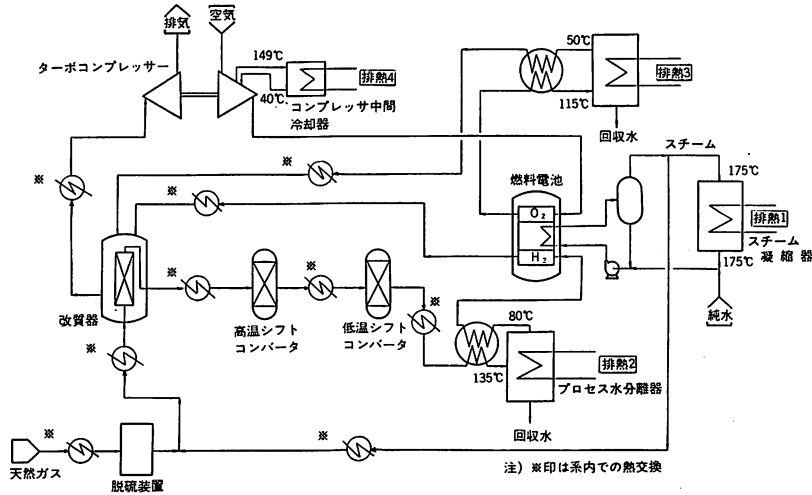


図-1 10MW水冷式燃料電池発電プラントからの排熱

表1 1万kW級燃料電池発電プラントの排熱量と温度レベル

分類	プラント内の排熱位置 (冷却位置)	出力 10MW (AC発電端)		出力 11MW (AC発電端)	
		排熱量 (Gcal/H)	温度レベル (入口/出口) (°C)	排熱量 (Gcal/H)	温度レベル (入口/出口) (°C)
排熱1	電池本体 冷却水系の 余剰スチーム	1.79	175/175 (潜熱のみ)	2.68	189.4/50
排熱2	プロセスガス 改質されたガスを 冷却して余剰水分 を凝縮させる冷却器	2.07	135/80	3.10	207/61
排熱3	排 空 気 空気極からの排空 気を冷却し電池で の生成水を凝縮さ せる冷却器	3.32	115/50	2.62	138/92
排熱4	コンプレッサ 2段コンプレッサ の中間冷却器	0.77	149/40	1.07	141/50
計		7.95	—	9.47	—

注) 1. 出力100%時の値を示す。
2. 温度レベルは熱交換器1次側の流体 (気体または液体) の入口、出口温度を示す。
排熱量はこの温度差を与えたときの値である。

の2つの設計例を示す。

ここでは4箇所から熱を取出しており、これを利用する場合個別に、または組合わせて回収する。実際に回収できる熱の温度レベルは、熱交換器2次側になるので表1の値より小さくなる。

一般に排熱の回収形態としては、160~170°Cの蒸気、80~90°Cの高温水、30~40°Cの低温水(熱源水)を作って、これを暖房・給湯、吸収式冷凍機熱源、ボイラ給水加熱、ヒートポンプなどに用いることになる。

5. 考えられる排熱利用システム

燃料電池には一つの建物を対象に設置するような小型のもの、いわゆるオンサイト型も考えられているが、

ここではもっと大型の発電プラントの排熱利用について考えてみたい。

5.1 有望な熱需要

大型燃料電池の排熱利用の対象としては、特定業種の産業用なども検討されているが、本命は暖冷房、給湯用としての地域熱供給であろう。

地域熱供給が発達している高緯度圏の欧州に比べると、わが国は夏季に冷房の要求があるため設備が複雑になるとか、春秋の熱需要が小さいとか、国情や生活様式による考え方の違いなどもあって、地域熱供給そのものの普及が必ずしも容易ではない。

それでも全国では既に25事業体、40箇所を数えるに至っているようなので、徐々にではあるが増加してゆくものと思われる。燃料電池がいろいろな制約を解決しながら、これにどうかかわりあうことになるか今後興味あるところである。

5.2 熱供給モデル

ここでは、燃料電池排熱利用のイメージをつかみ、具体的設計への足がかりを得るためのケーススタディに用いた熱供給モデルを紹介する。

モデルとしては、既存の2種類の熱供給システムに燃料電池排熱を利用する場合と、燃料電池の排熱利用を考慮して新しく構成する熱供給システムを考え、それぞれについて若干熱回収の形態を変えたケースを設定して検討した。熱供給モデルの概要を表2および図-2~4に示す。

各モデルの熱需要の形態については、一部の実測値および計画値をベースに、年間および各時間毎の熱需要量を想定した。

表2 熱供給モデル

種別 内容	既存熱供給システム		新熱供給システム
	ボイラー方式	蓄熱式ヒートポンプ方式	蓄熱式ヒートポンプ方式
システムの概要	ボイラで40kg/cm ² Gの高圧蒸気をつくり、暖房は減温減圧した6kg/cm ² Gの蒸気で、冷房は蒸気でターボ冷凍機を駆動してつくった4℃の冷水で行う。	都市排熱（ゴミ発電の復水器排熱、電力ケーブルの冷却却熱）を回収してセンタープラントの蓄熱槽に20～45℃の熱源水として貯え、ヒートポンプで暖房、給湯、冷房を行う。	冷房用冷水（7℃）は高温排熱と吸収式冷凍機でつくり、不足分はダブルバンドルターボ冷凍機（ヒートポンプ）で補う。 暖房・給湯用の温水（80℃）は高温排熱で直接つくるほか、低温排熱と上記ダブルバンドル冷凍機でもつくる。
対象建物	都市再開発地（ホテル、事務所、店舗などの高層ビル群）	都市近郊住宅団地（階層住宅、公共施設等）	都市再開発地（事務所、階層住宅、店舗文化施設等）
年間最大熱需要	温熱55Gcal/H, 冷熱75 "	温熱21Gcal/H, 冷熱10 "	温熱18Gcal/H, 冷熱21 "
適用する燃料電池の容量	10MW	10MW	11MW
燃料電池排熱の利用方法	・ボイラの給水加熱 ・蒸気として利用	・冷水製造、・温水製造、 ・熱源水製造	同左
概念図	図-2	図-3	図-4

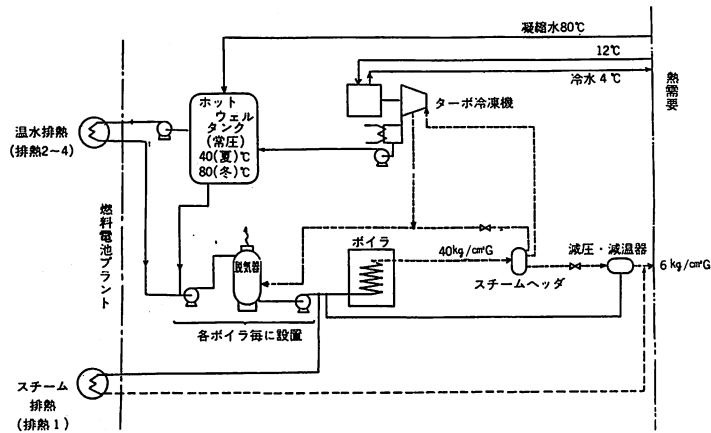


図-2 既存熱供給システムに適用するモデル（ボイラー方式）

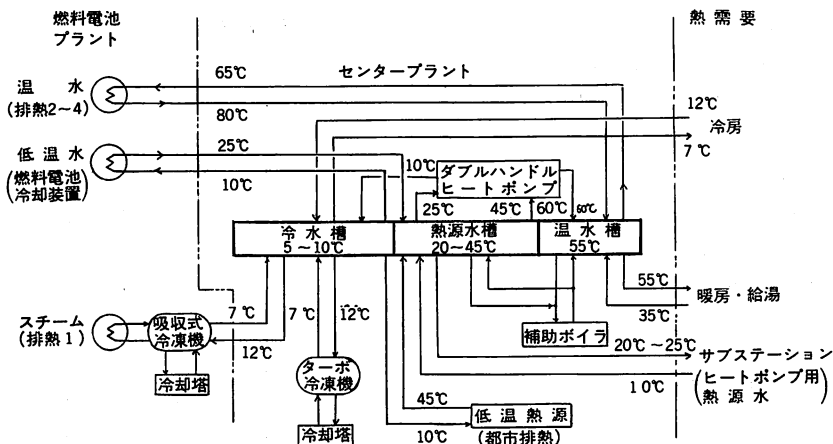


図-3 既存熱供給システムに適用するモデル（蓄熱式ヒートポンプ方式）

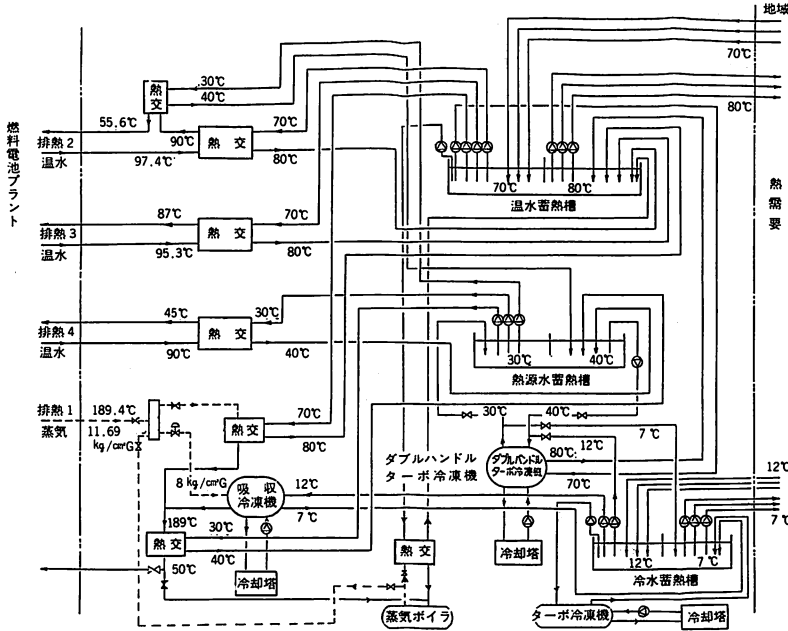


図-4 新熱供給システムモデル

設備の設計にあたっては、前述の基本的な考え方に
基づき、

- (1) 発電プラントと熱供給システムとはそれぞれ独立して運転でき、相手方が停止しても支障がないようにする。
- (2) 発電プラントの流体が直接熱供給システムに送出不されるよう、熱交換器で縁切りする。
- (3) 発電プラントは排熱利用のための設備を付加しても、効率など本来の性能に影響がないようにする。などを考慮した。

このため、燃料電池プラントからの排熱の取出し点については、例えば図-5に示すように冷却すべき流体の上流側（高温側）に排熱利用のための熱交換器を入れ、さらにその下流側（低温側）に自身の冷却装置につながる熱交換器も組込む。こうして排熱の利用量が変化しても燃料電池プラントの流体の戻り温度が規定値になるよう制御される。したがって排熱利用の場合でも燃料電池プラントは本来の大きさの冷却装置を備える。一方熱供給システムの方も、燃料電池排熱を利用する新しいシステムの場合でも、ボイラなどで自立稼働できるようにした。

なお、熱供給モデルの設備のうち、経済性検討のため設備費算定の対象とした範囲は、既存熱供給システムに適用の場合は「燃料電池プラントに付加する排熱回収機器と、既存熱供給システムに付加するインター

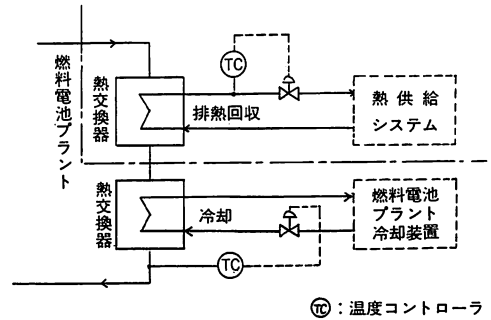


図-5 排熱取出し部の制御例

フェイス機器」とし、新しい熱供給システムの場合は、「燃料電池プラントに付加する排熱回収機器と熱供給システム全体（利用者側設備を除く）」とした。後者についてはさらに、比較のため燃料電池排熱を利用しない従来型の熱供給システムを別途設計し、これも対象とした。いずれも、設備を構成する機器の仕様、配置などを具体的に検討し費用を算出した。

6. 排熱利用率と経済性

設定した熱供給モデルを1年間運転する場合について、排熱の利用状況や経済性についての計算結果を整理すると、表3および表4の通りである。

概括すると、燃料電池の排熱量のうち実際に利用できる割合は、よいケースで30%程度であり、その場合の電気と熱を合わせた総合エネルギー効率は55%程度

表3 燃料電池排熱利用を既存熱供給システムに付加する場合のエネルギー利用効率，経済性

検討ケース	燃料電池の容量 [MW]	排熱量	排熱利用量	排熱利用率	総合エネルギー効率 [%]	排熱利用のため付加した設備の固定費 [百万円/年]	排熱利用による既存熱供給システムの経費節減分 [百万円/年]	利益 [百万円/年]	利用した排熱の評価額 $(\frac{D-C}{B})$ [円/Mcal]	
		(A) [Gcal/年]	(B) [Gcal/年]	$(\frac{B}{A})$ [%]						(C)
ボイラ方式	1	10	6.38×10 ⁴	1.44×10 ⁴	22.6	51.8	18	172	154	10.7
	2	"	"	1.15×10 ⁴	18.0	50.0	27	128	101	8.8
	3	"	"	2.58×10 ⁴	40.4	59.0	43	283	240	9.3
	4	"	"	2.35×10 ⁴	36.8	57.5	40	278	238	10.1
蓄熱式 ヒートポンプ方式	1	10	6.38×10 ⁴	9.05×10 ³	14.2	48.5	11	102	91	10.1
	2	"	"	9.14×10 ³	14.3	48.6	31	102	71	7.8
	3	"	"	1.57×10 ⁴	24.6	52.7	79	153	74	4.7
	4	"	"	1.75×10 ⁴	27.4	53.8	78	173	95	5.4
備考	A C 発電端	フル出力運転 (定検期間を除く)	実際に利用できる熱量		燃料電池の 入口燃料を 基準とした 電気と熱を 合せた効率	15年償却， 土地代を含む				

注) 検討ケースの説明

・ボイラ方式

- 1) スチーム (排熱1)
- 2) 温水 (排熱1~4)
- 3) スチーム・温水 (排熱1~4)
- 4) スチーム・温水 (排熱1~3)

・蓄熱式ヒートポンプ方式

- 1) 低温水 (発電プラント冷却装置)
- 2) 温水 (排熱2~4)
- 3) スチーム・温水 (排熱1~4)
- 4) スチーム・温水 (排熱1~4), 低温水

表4 燃料電池の排熱を利用した新しい熱供給システムのエネルギー利用効率，経済性

検討ケース	燃料電池の容量 [MW]	排熱量	排熱利用量	排熱利用率	総合エネルギー効率 [%]	燃料電池の排熱を利用する熱供給システムの年間総費用 [百万円/年]	従来型熱供給システムの年間総費用 [百万円/年]	総費用の差 [百万円/年]	利用した排熱の評価額 $(\frac{D-C}{B})$ [円/Mcal]
		(A) [Gcal/年]	(B) [Gcal/年]	$(\frac{B}{A})$ [%]					
1	蓄熱槽 3,000 m ³	7.6×10 ⁴	2.13×10 ⁴	28.0	54.2	448	709注)	261	12.3
							672	224	10.5
2	蓄熱槽 7,000 m ³	"	2.29×10 ⁴	30.1	55.2	462	710	248	10.8
							674	212	9.3
備考	A C 発電端	フル出力運転 (定検期間を除く)	実際に利用できる熱量		燃料電池の 入口燃料を 基準とした 電気と熱を 合わせた効率	固定費と運転費の合計 (15年償却土地代を含む)	同左		

注) 比較対象とした従来型熱供給システムの方式

上段: 吸収式冷凍機を使用

下段: ターボ冷凍機を使用

である。

排熱利用率がこの程度にとどまるのは、排熱の温度レベル、夜間および春秋の熱需要の減などが原因であるが、熱需要構成として事務所ビルが主体となるような都市部の熱供給では、一般にこの程度より向上させるのはむずかしいように思われる。近郊などで集合住宅を中心とする熱需要構成の場合は、将来的にみるとやや向上するかも知れない。そのようなモデルの既存熱供給システムへの適用ケースであまりよくないのは、都市排熱の受入れを優先させるからである。

次に経済性については、まず既存熱供給システムに適用の場合、排熱利用のために付加した設備の年経費と、排熱を利用したことによる既存熱供給システムの運転費の減少額とを比較したところ、排熱利用による利益があり、これを排熱利用量のMcalあたりでみると5～10円程度に評価できた。

また、燃料電池の排熱利用を考えて設計した新しい熱供給システムの場合、これとは別に排熱を使わない従来型熱供給システムを設計し、両者の年間総経費を比較したところ前者の方が有利となり、その差額を排熱利用量のMcalあたりでみると10円程度に評価できた。

これらの結果から、すくなくとも排熱利用のために設置する設備費は余裕をもって回収できそうなので、燃料電池の排熱利用が経済的に成立つことがうかがえる。もちろん発電プラントそのもののコストは今回検討の対象外であり、これは発電のみで実用になるレベ

ルまで低減させることが必要である。

今回の検討例は、発電プラントの大きさと熱需要の規模を適当に選んだわけではない。発電プラントは事業用として当面実現可能性のあるものとして1万kW級を取上げ、熱供給モデルは実在するものに近似させたものである。また、システムの構成についても最適なものが案出できたとは言えない。さらに発電プラントをフル出力運転として行ったが、夜間負荷を下げるスケジュール運転での検討もすべきかも知れない。

燃料電池プラントの実用化までには、まだ若干の年月が必要である。排熱利用についても広く活発な研究が望まれる。

7. あとがき

事業用リン酸型燃料電池の排熱を地域冷暖房に利用する場合のイメージについて、熱供給モデルによるケーススタデーの結果を示しながら概括的に述べた。

熱需要に対する最適システムの組み方については、まだ今後の研究にまたなければならぬが、排熱量のうち30%程度は利用でき、利用するための設備費も回収できるとみられるので、燃料電池の実用化時には地点を選べば熱併給発電が期待できそうである。

なお、本稿で紹介した排熱利用のケーススタデーは、㈱東芝および日本燃料開発㈱のご協力を得て行った研究の中の一部である。両社の関係者にお礼を申しあげる次第である。

