

コプロダクションによる 革新的エネルギー利用システム

Innovative Energy Utilization System Based on
Material and Energy Coproduction

東京大学教養学部附属教養教育高度化機構
環境エネルギー科学特別部門
特任教授

堤 敦司
Atsushi Tsutsumi

元千代田化工建設(株)

松田一夫
Kazuo Matsuda

なぜ我々は大量のエネルギーを消費しているのか？

1.1 エネルギーのパラドックス

エネルギーは保存されており、使っても使っても減ることはなく、エネルギーの総量は一定である。エネルギーが保存されているならば、エネルギーは「消費」することなどできないはずで、エネルギーを消費すること自体が物理法則に反することになる。しかし、我々は石油、天然ガス、石炭など大量の化石エネルギーを消費し続けており、地球温暖化や環境汚染などを引き起こしている。この逆説はどのように理解すれば良いのか？

1.2 エネルギー利用体系

現在のエネルギー利用体系をFig.1に示した。エネルギー利用体系は、一次エネルギーから熱あるいは仕事を生産するエネルギー生産(変換)システムと、熱または仕事(電力または動力)を利用するエネルギー利用システムとからなってい

る。エネルギー利用システムは、さらに (a) 熱利用、(b) 動力・電力利用、(c) 物質生産、の3つに大別することができる。

まず、エネルギー生産システムでは、燃料(化学エネルギー)から熱(熱エネルギー)または仕事(機械エネルギーまたは電気エネルギー)を生産する。熱は、燃料を燃焼させて発生させ、仕事は発生させた熱をさらに熱機関により機械仕事を生み出す。機械仕事はさらに発電機で電気仕事に変換される。このように、エネルギー生産システムでは、燃料を燃焼あるいは燃焼-熱機関を介して、熱および仕事を生産し、エネルギー利用システムに供給する。熱利用システムおよび物質生産には熱を、動力利用には機械仕事あるいは電気仕事が供給される。エネルギー利用システムに投入されたエネルギーはすべて廃棄エネルギーとして捨てられる。

1.3 エネルギー消費とは

エネルギー生産システムはエネルギー変換プロセスであり、エネルギー利用システムと合わせて、Fig.2のようにエネルギー変換ダイヤグラムで表すことができる。エネルギー

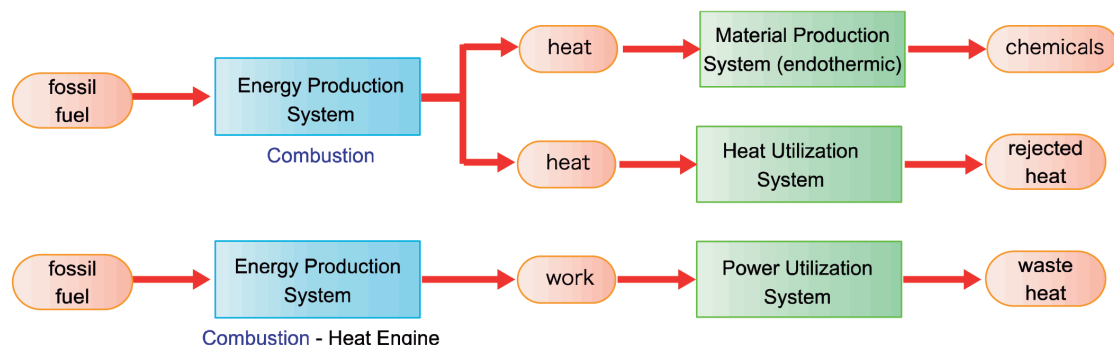


Fig.1 Current energy utilization system

を（エクセルギー Ex 、アネルギー An ）の形で表記しており、エネルギー量はエクセルギーとアネルギーの和である。エネルギー変換では、可逆過程ではエネルギーはもちろんのことエクセルギーとアネルギーもそれぞれ保存されている。しかし、不可逆過程ではエクセルギー破壊が起こり、破壊されたエクセルギーは環境温度の熱、すなわちアネルギーに転化する。このときエクセルギー破壊 Ex_{loss} はエントロピー生成 S_{gen} と次式で関係付けられる。

$$Ex_{loss} = T_0 S_{gen} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 T_0 は環境温度である。エネルギー利用の本質はエネルギーから仕事を取り出し、それにより何かしらの効用を得ることであるから、取り出し得る最大仕事、すなわちエクセルギーが、エクセルギー破壊されアネルギーに転化することは、利用できるエネルギーが減少することを意味する。すなわちエネルギー消費とはエクセルギー破壊のことであり、エクセルギーがアネルギーに転化することである。

1.4 エネルギー利用体系におけるエクセルギー破壊

Fig.2に示すように、すべてのエネルギー生産システムでは、燃焼により化学エネルギーを熱エネルギーに変換する過程が含まれる。燃焼は典型的な不可逆過程であり、ここで大きなエクセルギー破壊が発生していることがわかる。このエクセルギー破壊は、燃料の持つエクセルギーのほぼ6割に当たり、石油、石炭、天然ガスという化石エネルギー資源をまず燃焼させて熱エネルギーに変換するという、我々のエネルギー利用技術では、燃焼過程で半分以上のエクセルギーを無駄にしているのである。エネルギー生産（変換）システムでは、エネルギー変換におけるエクセルギー破壊をいかに低減

するかが、省エネルギーのキーポイントである。

一方、エネルギー利用システムでは、熱あるいは仕事が生産されるが、物質生産を除き、それらはすべて廃棄されている。エネルギー保存則より、必ず投入したエネルギー量は廃棄するエネルギー量に等しい。エネルギー利用とは、仕事による効用を得ることであるから、必要以上に過剰にエクセルギーを投入している分を削減することが重要である。

2 熱利用システムにおける熱の完全循環¹⁻⁸⁾

2.1 熱の完全循環の原理

Fig.3に、熱利用で最も単純な昇温・降温サイクルプロセスについてまとめた。なお、昇温・降温サイクルプロセスの点線で囲まれたモジュールは化学反応を伴わない任意の単位操作を示す。エネルギー生産システムで燃料を燃焼させて熱を発生させ、これを熱交換モジュールを介して、熱利用システムに与える。エクセルギー破壊が起こるのは燃焼および熱交換モジュールでの伝熱過程のみであり、熱利用（昇温・降温）システムでは、投入した熱 Q_m をそのまま同じ温度の熱として排出しており、エネルギーはもちろんエクセルギーも保存されている。すなわち、「加熱」により投入されたエネルギーはそのまま廃棄されているのである。

熱は高温側から低温側にしか伝わらないため、ヒートトランスミッター（HT）からの熱をヒートレシーバー（HR）に戻し熱を完全に循環利用するためには、排出する熱の温度を、投入した熱の温度 T より、伝熱に必要な温度差 ΔT だけ高くしてやればよい。結局、温度を T から $T + \Delta T$ に高めて伝熱させるのに必要な最少仕事 W_{min} を与えてやれば、熱を完

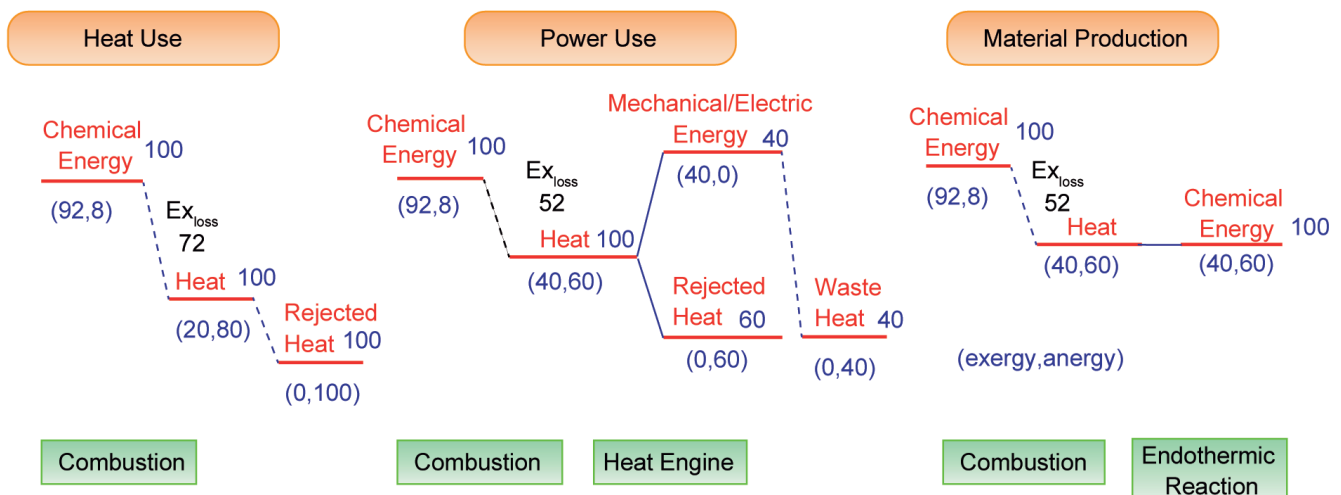


Fig.2 Energy production and utilization system

全循環させることができる。これには、温度 $(T + \Delta T)$ の熱を追加する、すなわち $W_{\min}$ に相当するエクセルギーを熱で供給する方法（自己熱回収）とプロセス流体（ガスまたは蒸気）を断熱圧縮して温度を ΔT だけ高くする、すなわち $W_{\min}$ を仕

事で供給する方法（自己熱再生）とがある。

Fig.4に、最も単純なガス系の (a) 加熱・冷却システム、(b) 自己熱再生熱循環システムおよび (c) 自己熱回収熱循環システムの、モジュール化表現、 T - S 線図およびエネルギー変

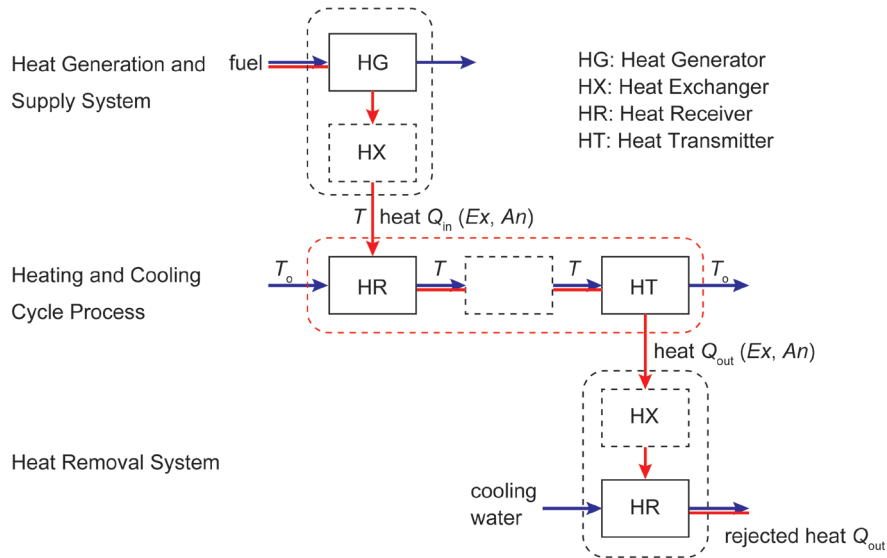


Fig.3 Heating and cooling cycle process

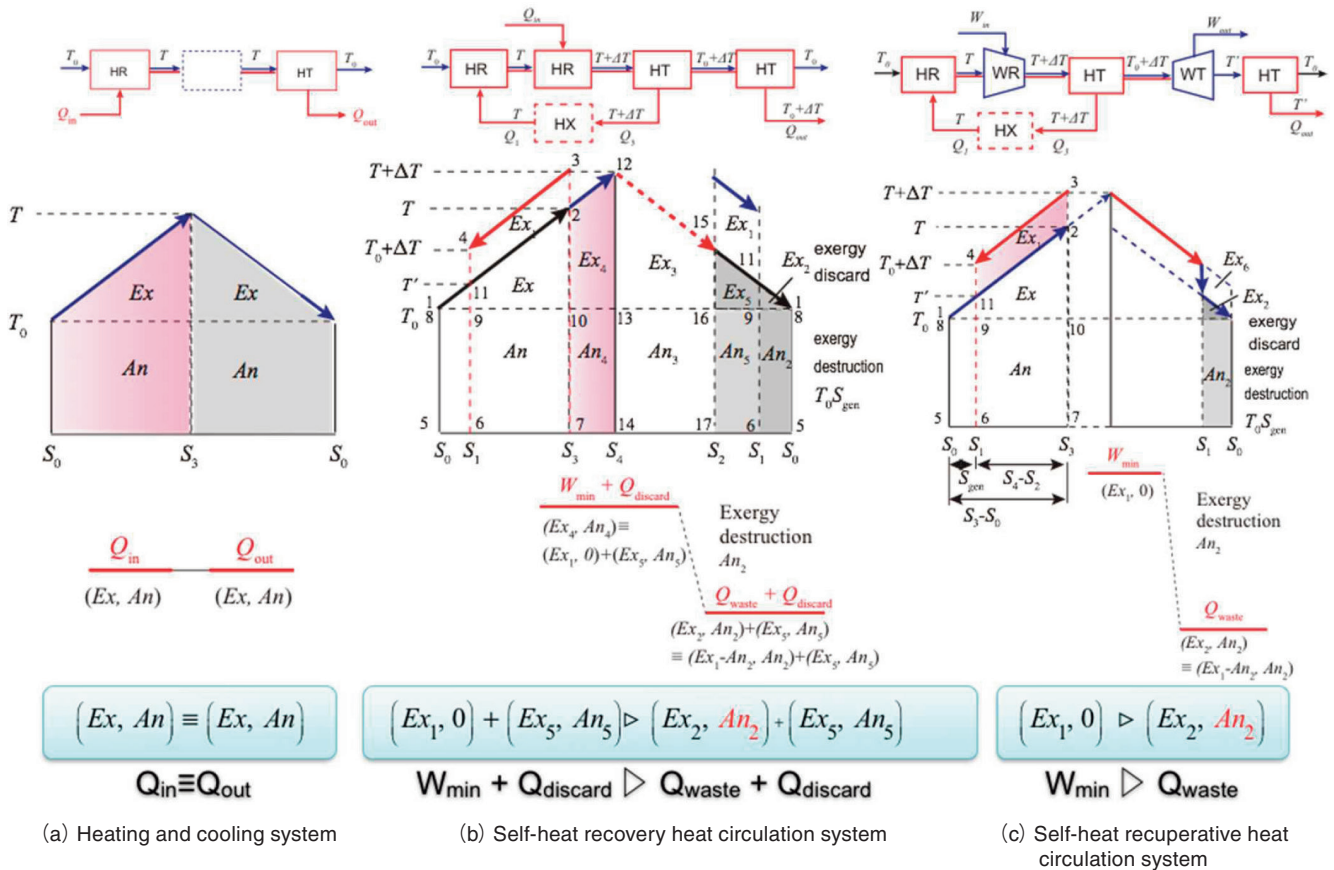


Fig.4 Thermodynamic mechanism of combustion heating, self-heat recovery and self-heat recuperation.

換ダイアグラムを示した。自己熱回収および自己熱再生熱循環システムは、ともに T - S 線図で $1 \rightarrow 2 \rightarrow 7 \rightarrow 5$ で囲まれた面積で表される熱 Q_1 (Ex, An) が循環利用されている。自己熱回収の場合は、温度 ($T + \Delta T$) の熱 Q_{in} (Ex_4, An_4) を加えて、温度を熱交換できる $T + \Delta T$ まで高めて、熱交換モジュールを介して、自己熱を循環させている。

自己熱再生の場合は、熱を加える代わりに断熱圧縮仕事 W_{in} を加え温度を $T + \Delta T$ まで高めて自己熱を循環させている。このとき、熱交換した後、膨張タービンで動力回収し、加えた正味の仕事は ($W_{in} - W_{out}$) で、これが W_{min} ($Ex_1, 0$) である。 $Q_{in} = W_{in}$ だが、自己熱再生では W_{out} が膨張タービンにより回収できる。自己熱回収および自己熱再生熱循環システムで、エクセルギー破壊が起こるのは熱交換モジュールで温度 $T + \Delta T$ の熱 Q_3 が温度 T の熱 Q_1 に伝熱される熱エネルギー-熱エネルギー変換のみであり、エクセルギー破壊 $T_0 S_{gen}$ は、 T - S 線図 $1 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 9$ で囲まれた面積で表され、廃熱 Q_{waste} のエネルギー An_2 と等しい。したがって、自己熱を循環させるために必要な最小仕事 W_{min} は、 T - S 線図で $2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 11$ で囲まれた面積で表される ($Ex_1, 0$) であり、この仕事 W_{min} ($Ex_1, 0$) は、伝熱によるエクセルギー破壊を補償するために用いられ、廃熱 Q_{waste} (Ex_2, An_2) として捨てられる。

一方、自己熱回収熱循環システムでは、自己熱を循環させるために必要な最小仕事 W_{min} は自己熱再生の場合と同じであり、これを熱 Q_{in} で与えているのである。したがって投入熱 Q_{in} は W_{min} と放棄される熱 $Q_{discard} = (Ex_5, An_5)$ との和であり、自己熱再生より $Q_{discard} = (Ex_5, An_5)$ の分だけ多くのエネルギーを必要とする。この $Q_{discard}$ は、 $W_{in} = Q_{in}$ であることから、 $W_{out} = Q_{discard}$ であることがわかる。すなわち熱循環させる場合、 W_{min} を仕事で与えれば圧力エクセルギーを W_{out} として回収できるが、熱で W_{min} を与えると、 W_{out} が $Q_{discard}$ になっているので回収できないのである。

さらに、断熱圧縮で昇温した場合は、理想的ならばエクセルギー破壊は起こっておらず、断熱膨張させることで理想的にはすべて圧縮動力を回収できる。このように、熱利用システムにおいて、加熱するのではなく、熱循環に必要な最小仕事 W_{min} を与え熱を完全に循環利用することで、エネルギー消費を激減させることができる。自己熱再生技術の革新性は、燃焼で発生させた熱で加熱するのではなく、一切熱を加えることなく仕事を加えて熱を完全に循環利用することにある。燃焼に伴うエクセルギー破壊をゼロにするとともに、エネルギー熱利用において加熱で与えなければならない熱エネルギーを $1/5 \sim 1/20$ に激減することができる。ヒートポンプは燃焼によるエクセルギー破壊がない分は省エネルギーであるが、あくまでも「加熱する」のであって、熱利用に必要な熱エネルギー量を削減するわけではなく、加えた熱はすべて廃棄

してしまっている。

2.2 自己熱再生の応用

自己熱再生は、すべての熱的単位操作に提供可能であり、これまで、反応プロセス⁹⁻¹⁴⁾、蒸留プロセス¹⁵⁻²⁰⁾、乾燥プロセス²¹⁻³⁰⁾、PSA (Pressure Swing Adsorption)^{31,32)}、CO₂ 化学吸収分離プロセス^{33,34)}、海水淡水化^{35,36)}、深冷分離空気プラント³⁷⁻³⁹⁾、など多くの熱的プロセスに適用し、エネルギー消費を $1/5 \sim 1/10$ と劇的に低減できることが明らかになっている。また、自己熱再生型バイオエタノール蒸留の実証試験が行われ、実際にエネルギー消費量が 85% 削減できることが確認された。

3 コプロダクション —物質とエネルギーの併産—

3.1 物質生産におけるコプロダクション^{40,41)}

熱利用システムは、熱を供給するのではなく、熱を循環させるのに必要な仕事を加え、熱を完全循環利用することで大幅な省エネルギーとなる。これは、熱を発生させるための燃焼によるエクセルギー破壊がないことから、エネルギー生産システムにおいてもエネルギー消費を削減することができる。

一方、物質生産 (吸熱反応) に供給する熱は、化学エネルギーとして保存される。したがって物質生産 (吸熱反応) に必要な熱は、エネルギー生産システムで生産し供給する必要がある。物質生産において吸熱反応と発熱反応とがあるが、従来は、吸熱反応に必要な反応熱を、燃料を燃焼させて熱を発生させ供給する一方、発熱反応の反応熱は冷却廃熱として捨てられてきた。発熱反応の反応熱もエクセルギー分は動力・電力として取り出せるはずなのに、みすみす捨てている。そこで、発熱反応の反応熱あるいは燃料電池や熱機関の排熱を吸熱反応の反応熱として供給すれば、燃焼によるエクセルギー破壊の大幅な低減になる。これが、物質とエネルギーの併産 (コプロダクション) の概念である。

コプロダクションの原理を Fig.5 に示した。(a) は発熱反応の反応熱を、吸熱反応に供給した場合で、(b) は燃料電池や熱機関の排熱を吸熱反応の反応熱として供給した場合で、(a) および (b) はともに、燃焼により熱を発生させる必要がない、すなわち燃焼にともなうエクセルギー破壊がない。(c) は発熱反応の排熱から熱機関でエクセルギーを回収する場合である。(a) は化学品 A と化学品 B のコプロダクションで、大幅な省エネルギーとなるが、必ずしも常にこのような温度と熱量がバランスするとは限らない。その場合、(b) や (c) のようにエネルギーと化学品の併産 (コプロダクション) で対応することができる。

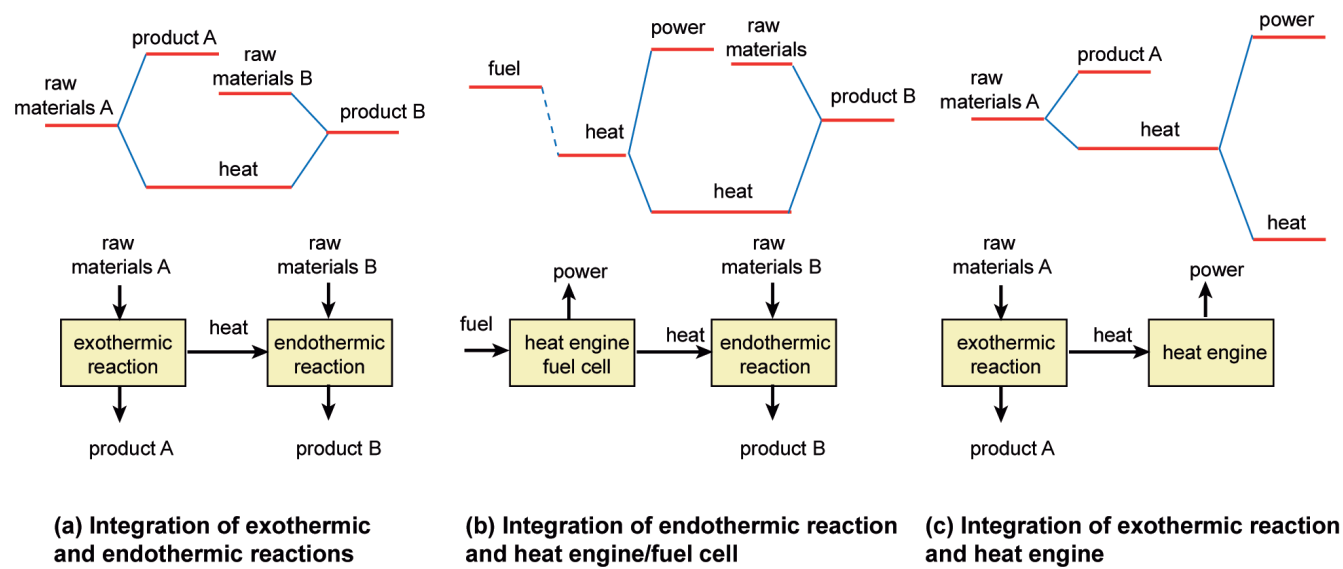


Fig.5 Principle of coproduction

物質生産（発熱反応）で生産される熱は、反応を平衡的に進行させる限りエクセルギー破壊はない。コプロダクションは燃焼をとまわらないため、燃焼によるエクセルギー破壊をなくことができ、大幅な省エネルギーが図れることになる。

3.2 エネルギー生産システムにおけるコプロダクション^{42,43)}

エネルギー生産システムは、すべてまず燃焼という化学エネルギーから熱エネルギーへのエネルギー変換であり、そこで大きなエクセルギー破壊が起こり、エクセルギーの半分以上がアネルギーに転化してしまうことはすでに述べた。燃焼によらず熱を生産する技術として、物質生産（発熱反応）における反応熱を利用するコプロダクションについて前項で述べた。しかし、動力・電力生産では、すべて燃焼から始まっており、発生した熱を熱機関で機械仕事に変換しており、燃焼のエクセルギー破壊は減らすことは難しいと考えられている。

Fig.6に、固体酸化物形燃料電池（SOFC）のエネルギー変換ダイヤグラムを示した。燃料電池は、水素と酸素の反応を、アノード反応とカソード反応の二つの電気化学反応に分割して行わせ、化学エネルギーを、熱エネルギーを介さずに、直接電気エネルギーと熱エネルギーに変換する。電気化学反応は原理的には平衡的に進行させることができるため、エクセルギー破壊がない。過電圧という電気化学的な不可逆性があるが、燃料電池は燃焼に比べてはるかにエクセルギー破壊が小さい。Fig.6から判るように、SOFCはエクセルギー破壊が4%と燃焼に比べて非常に小さく、化学エネルギーを電気エネルギーと熱に変換するコジェネレーターであることがわかる。ただし、これは燃料電池の排熱を900℃で取り出し利用

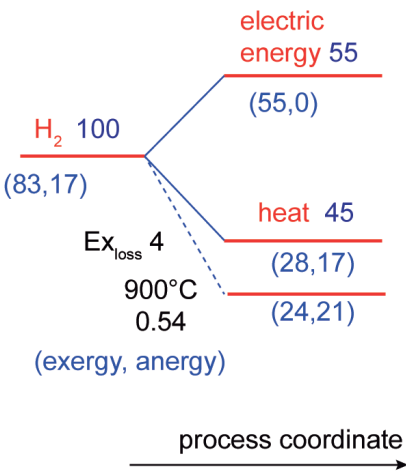
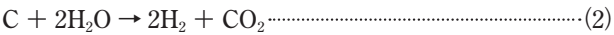


Fig.6 Energy conversion diagram of SOFC

する場合であり、実際は、より低い温度の熱として取り出すため、エクセルギー破壊はより大きくなる。そこで燃料電池反応の発熱と吸熱反応の吸熱とを組み合わせコプロダクション化を図る。

炭素系資源からのガス化水素製造の基本反応は、水性ガス反応とシフト反応を組み合わせた次式である。



この反応は吸熱反応であるため、通常は燃焼反応あるいは部分酸化反応と組み合わせる。そこで燃焼反応あるいは部分酸化反応の代わりに燃料電池反応と組み合わせた電力と水素のコプロダクションを考える。バイオマスのエクセルギー再生ガス化とSOFCを組み合わせた水素と電力のコプロダク

ションのプロセスフロー図をFig.7に、エネルギー変換ダイヤグラムをFig.8に示す。ガスタービンおよびスチームタービンが不要でエクセルギー破壊はわずか11%で、発電効率は燃料電池だけで72%にもなることがわかる。このとき、ガス化で生成した水素を全て燃料電池に導入し過剰の燃料電池の排熱を熱として取り出す電力と熱のコージェネレーションになっている。ここで、燃料電池に供給する水素の量を減らしガス化に必要な反応熱と燃料電池の排熱をバランスさせ、余剰の水素を取り出せば、バイオマスのエネルギーを100%とすると、水素が63%、電力が37%とエクセルギー破壊はわずか5%で水素と電力を併産するコプロダクションとなることがわかる。この熱と電気のコージェネレーションモードと水素と電力のコプロダクションモードのエネルギーバランスをFig.9に示した。このシステムは、ほとんどエクセルギー破壊を伴うことなく負荷変動に容易に対応できることがわかる。

4 まとめ

従来のエネルギー利用体系では、エネルギー生産（転換）システムで、燃料の燃焼によって熱を発生させ熱利用システムに供給する。動力・電力を生産する場合は、さらに発生した熱を熱機関により仕事に変換して取り出している。すべて、燃焼・熱生成からスタートしており、ここで大きなエクセルギー破壊が起こり、ほぼ6割のエクセルギーを無駄にしている。また、熱および仕事は本来ともに保存されており、何度でも利用できるものなのに、エネルギー利用システムに投入された熱および仕事はそのまま廃棄されている。そこ

で、熱利用では、物質生産（吸熱反応）を除いて、加熱するのではなく、熱を完全循環させることで、大幅な省エネルギーとなることを解説した。このとき熱を循環させるために最小仕事 $W_{\min}$ を与える必要があるが、 $W_{\min}$ を熱で与える自己熱回収よりも仕事で与える自己熱再生の方がさらに省エネルギーとなり、全ての熱プロセスを自己熱再生によって熱の完全循環利用を図ることでエネルギー消費を1/5~1/2まで激減させることができる。

物質生産（吸熱反応）では、熱を与える必要があるが、これを発熱反応の反応熱で供給することにより、燃焼に伴うエクセルギー破壊をゼロとすることができる。これがコプロダクションの原理である。さらに動力・電力生産で熱機関を利用することをやめ、エクセルギー破壊が少ない燃料電池に置き換える。燃料電池の燃料である水素を生産するのは吸熱反応であるから、この水素生産に必要な反応熱を燃料電池の排熱により供給する電力と水素のコプロダクションでは、エ

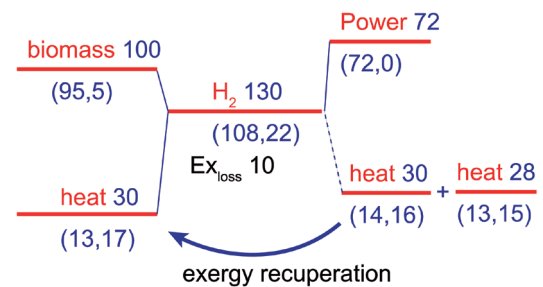


Fig.8 Energy conversion diagram for power and hydrogen coproduction based on the integration of exergy recuperative biomass gasification and SOFC

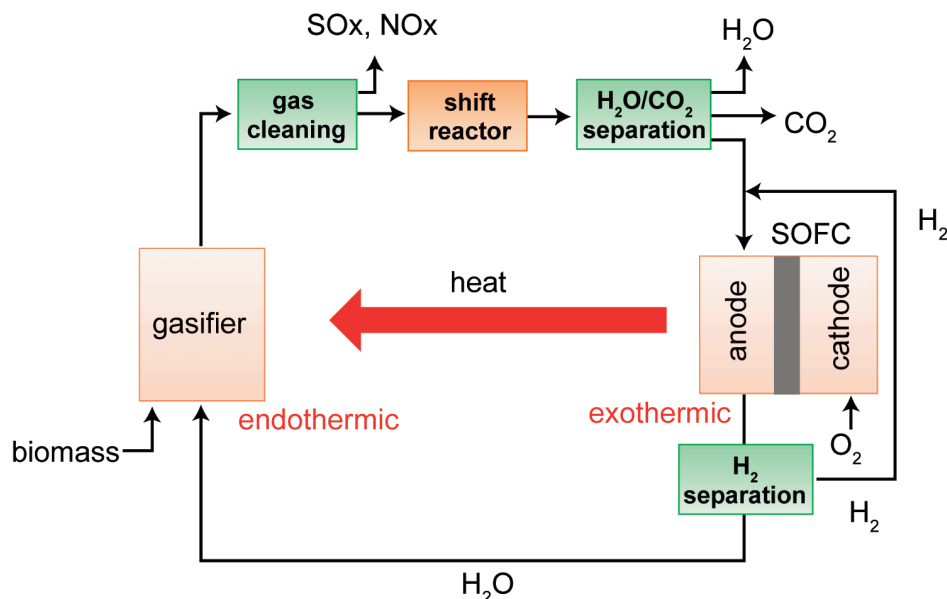


Fig.7 Coproduction system integrated exergy recuperative biomass gasification and SOFC

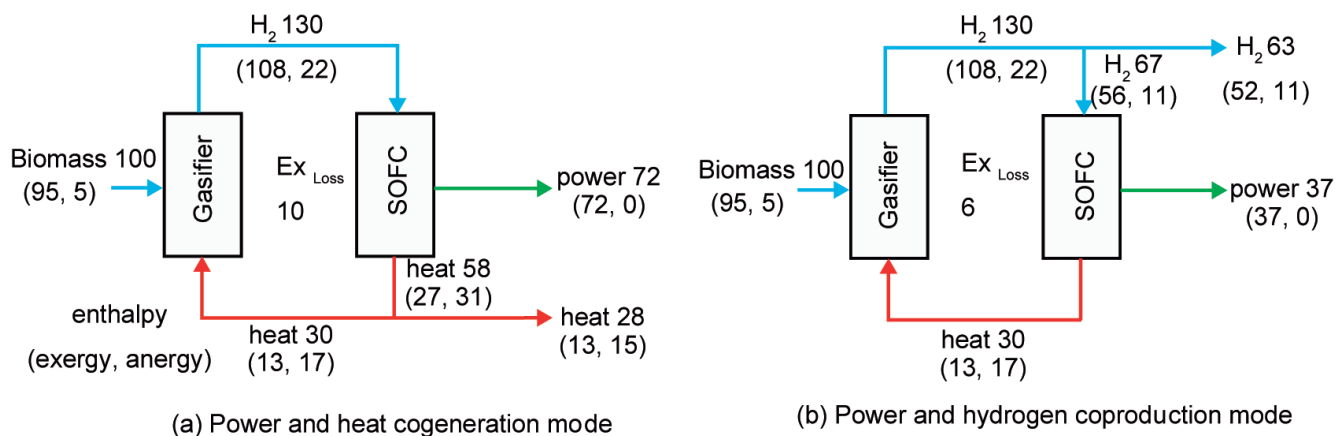


Fig.9 Power and heat cogeneration mode and power and hydrogen coproduction mode.

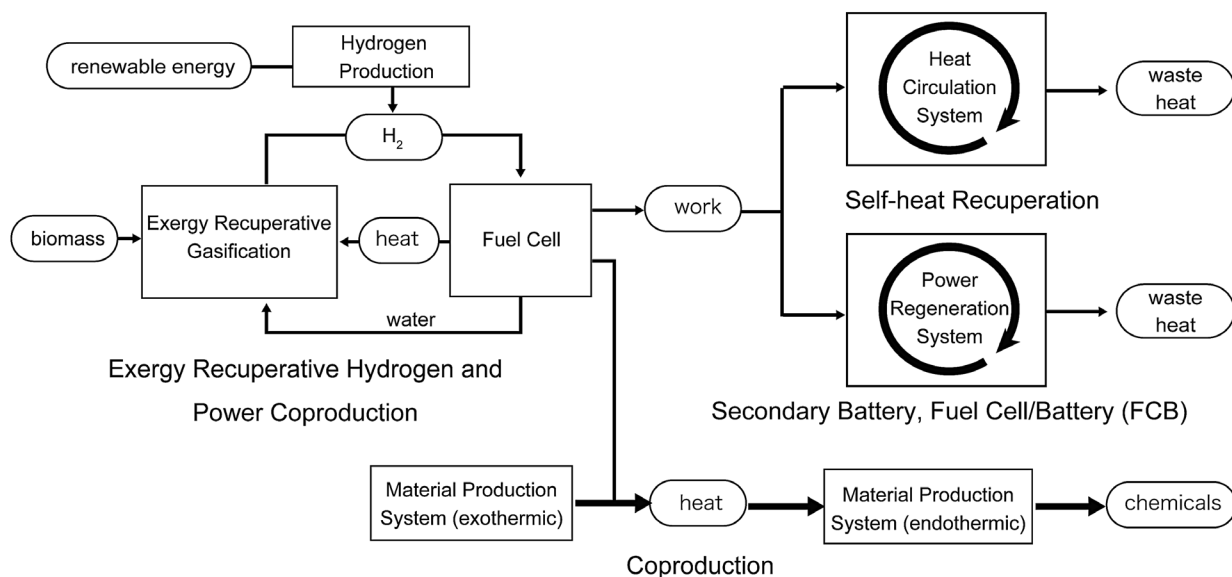


Fig.10 Future energy utilization system

クセルギー破壊がほとんどなく、エネルギーを高度に有効利用することが可能となる。この将来のエネルギー利用体系を Fig.10 に示した。現在のエネルギー利用体系 (Fig.1) と比較してほしい。エクセルギーの観点から、燃焼により熱を発生させ半分以上のエクセルギーを破壊し、投入した熱はそのまま捨ててしまうという最悪のエネルギー利用法から、燃焼させない、熱は循環利用する、発電は燃料電池で行い、その排熱をエネルギー変換 (燃料生産) および物質生産 (吸熱) に利用するコプロダクションシステムに、早期に転換していくことが求められる。

参考文献

- 1) A.Tsutsumi and Y.Kansha : Chem. Eng. Trans., 61 (2017), 1759.
- 2) Y.Kansha, Y.Kotani, M.Aziz, A.Kishimoto and A.Tsutsumi : J. Chem. Eng. Jpn., 46 (2013), 87.
- 3) Y.Kansha, N.Tsuru, K.Sato, C.Fushimi and A.Tsutsumi : Ind. Eng. Chem. Res., 48 (2009), 7682.
- 4) 堤敦司編著：熱エネルギー高度有効利用と省エネルギー技術，フロンティア出版，(2015年3月15日)
- 5) 堤敦司：日本エネルギー学会誌，91 (2012)，592.
- 6) 堤敦司：化学工学，77 (2013)，179.
- 7) 堤敦司：分離技術，45 (2015)，146.
- 8) 堤敦司：エレクトロヒート，209 (2016)，1.
- 9) Y.Kansha, M.Ishizuka, A.Tsutsumi, Y.Kambe, T.Okamura and J.Yoshihara : Chem. Eng. Trans., 61 (2017), 823.
- 10) Y.Kansha, M.Ishizuka, C.Song and A.Tsutsumi : Energy,

- 90 (2015), 122.
- 11) Q.Fu, C.Song, Y.Kansha, Y.Liu, M.Ishizuka and A.Tsutsumi : Chem. Eng. J., 278 (2015), 556.
- 12) Y.Kansha, M.Ishizuka, C.Song and A.Tsutsumi : Applied Thermal Eng., 70 (2014) 1189.
- 13) Y.Kansha, M.Ishizuka and A.Tsutsumi : Chem. Eng. Trans., 35 (2013), 37.
- 14) K.Matsuda, K.Kawazuishi, Y.Hirochi, R.Sato, Y.Kansha, C.Fushimi, Y.Shikatani, H.Kunikiyo and A.Tsutsumi : Applied Thermal Eng., 30 (2010), 2300.
- 15) Y.Kansha, A.Kishimoto and A.Tsutsumi : Applied Thermal Eng., 43 (2012), 153.
- 16) Y.Kansha, A.Kishimoto and A.Tsutsumi : Asia-Pacific J. Chem. Eng., 6 (2011), 320.
- 17) K.Matsuda, K.Kawazuishi, Y.Kansha, C.Fushimi, M.Nagao, H.Kunikiyo, F.Masuda and A.Tsutsumi : Energy, 36 (2011), 4640.
- 18) Y.Kansha, N.Tsuru, C.Fushimi, K.Shimogawara and A.Tsutsumi : Chem. Eng. Sci., 65 (2010), 330.
- 19) Y.Kansha, N.Tsuru, C.Fushimi and A.Tsutsumi : J. Chem. Eng. Jpn., 43 (2010), 502.
- 20) Y.Kansha, N.Tsuru, C.Fushimi and A.Tsutsumi : Energy & Fuels, 24 (2010), 6099.
- 21) K.Bando, Y.Kansha, M.Ishizuka and A.Tsutsumi : J. Cleaner Production, 168 (2017), 1244.
- 22) Y.Liu, Y.Kansha, M.Ishizuka, Q.Fu and A.Tsutsumi : Fuel Processing Technol., 136 (2015), 79.
- 23) Y.Liu, M.Aziz, Y.Kansha, S.Bhattacharya and A.Tsutsumi : Fuel Processing Technol., 117 (2014), 66.
- 24) Y.Liu, J.Peng, Y.Kansha, M.Ishizuka, A.Tsutsumi, D.Jia, X.T.Bi, C.J.Lim and S.Sokhansanj : Fuel Processing Technol., 122 (2014), 170.
- 25) Y.Liu, M.Aziz, Y.Kansha and A.Tsutsumi : Chem. Eng. Sci., 100 (2013), 392.
- 26) M.Aziz, Y.Kansha, A.Kishimoto, Y.Kotani, Y.Liu and A.Tsutsumi : Fuel Processing Technol., 104 (2012), 16.
- 27) Y.Liu, M.Aziz, C.Fushimi, Y.Kansha, K.Mochidzuki, S.Kaneko, A.Tsutsumi, K.Yokohama, K.Myoyo, K.Oura, K.Matsuo, S.Sawa and K.Shinoda : Ind. Eng. Chem. Res., 51 (2012), 9997.
- 28) C.Fushimi, Y.Kansha, M.Aziz, K.Mochidzuki, S.Kaneko, A.Tsutsumi, K.Matsumoto, K.Yokohama and K.Kosaka : Drying Technol., 29 (2011), 105.
- 29) M.Aziz, C.Fushimi, Y.Kansha, K.Mochidzuki, S.Kaneko, A.Tsutsumi, K.Matsumoto, T.Hashimoto, N.Kawamoto, K.Oura, K.Yokohama, Y.Yamaguchi and M.Kinoshita : Chemical Engineering & Technol., 34 (2011), 1095.
- 30) M.Aziz, Y.Kansha and A.Tsutsumi : Chem. Eng. Processing, 50 (2011), 944.
- 31) C.Song, Y.Kansha, Q.Fu, M.Ishizuka and A.Tsutsumi : J. Taiwan I. Chem. Eng., 64 (2016), 69.
- 32) C.Song, Y.Kansha, M.Ishizuka, Q.Fu and A.Tsutsumi : Chem. Eng. Processing : Process Intensification, 94 (2015), 20.
- 33) A.Kishimoto, Y.Kansha, C.Fushimi and A.Tsutsumi : Clean Technologies and Environmental Policy, 14 (2012), 465.
- 34) A.Kishimoto, Y.Kansha, C.Fushimi and A.Tsutsumi : Ind. Eng. Chem. Res., 50 (2011), 10128.
- 35) H.Mizuno, Y.Kansha, M.Ishizuka and A.Tsutsumi : Applied Thermal Eng., 89 (2015), 1096.
- 36) H.Mizuno, Y.Kansha, A.Kishimoto and A.Tsutsumi : Clean Technologies and Environmental Policy, 15 (2013), 765.
- 37) Q.Fu, Y.Kansha, C.Song, Y.Liu, M.Ishizuka and A.Tsutsumi : Applied Energy, 162 (2016), 1114.
- 38) Q.Fu, Y.Kansha, C.Song, Y.Liu, M.Ishizuka and A.Tsutsumi : Energy, 103 (2016), 440.
- 39) Y.Kansha, A.Kishimoto, T.Nakagawa and A.Tsutsumi : Separation and Purification Technology, 77 (2011), 389.
- 40) 堤敦司 : 機械の研究, 63 (2011), 907.
- 41) 堤敦司 : エネルギー・資源, 26 (2005), 122.
- 42) 堤敦司 : 日本エネルギー学会誌, 93 (2014), 601.
- 43) 堤敦司 : Petrotech, 33 (2010), 638.

(2018年12月20日受付)