プラズマ反応を利用した炭酸ガスの改質[†] (燃料種等への直接変換の可能性実験)

加藤征三^{††}・奥山元洋^{*}・久村和明^{**}・原 武司

三重大学工学部 機械工学科, 514-8507 津市上浜町 1515

地球温暖化の主因である CO₂ を燃料種等の再利用できる化学種へ改質する可能性実験を試みた。ここでは安定な CO₂ をプラズマ活性化反応を利用して分解させ、ここに水素を導入して CO, CH₄, CH₃OH などの燃料種へ直接改質することを行った。本実験では、K-G 型分子線発生装置を用い、そこへ CO₂ 単体と (CO₂+H₂) と (CO₂+H₂+Ar) の混合気体を導入して、直流グロー放電型反応炉を通過させ、プラズマ反応で生成される化学種を飛行時間 (TOF) 法と四重極質量分析計 (QMS) で検出し、化学種の特定と改質係数の測定を行った。実験は気体混合比や放電電圧を変化させて行った結果、CO, CH₄, CH₃OH 等の燃料種が比較的良好な効率で改質できることを検証した。また、放電電圧の大きさが改質係数に大きく寄与すると共に、H₂ の混合割合により CH₄ と CH₃OH の生成割合を制御できる可能性があることもわかった。

結 言

COP 3 の議題書にも指摘されているように炭酸ガス (CO₂) を主因とする地球温暖化対策が 21 世紀に向けての重要な課題となっている。従って、CO₂ の環境マネジメント技術の確立が要請されており、排出抑制、分離・回収、輸送・貯留などの技術開発は積極的に推進されているが、CO₂ を再利用する研究・技術開発は十分なされていない (Shibusuki, 1995)。この再利用段階が部分的にでも実現できれば、CO₂ リサイクル循環系が構築されることになり、その意義は大きいものと思われる。

本研究は CO₂ の再利用技術を探る目的で、CO₂ 単一気体および (CO₂+H₂) 混合気体をプラズマ電離場中へ噴出し、その反応活性化効果により、CO, CH₄, CH₃OH 等の燃料種として活用できる化学種へ直接物質変換することを実験的に試みたものである。ここで、プラズマを用いた理由は、化学的に安定な CO₂ を比較的容易に反応活性種へ分解することができ、他の化学種との反応も外部から印加される電磁場によって最適に制御できることによる。また、将来的に低廉なエネルギー源として太陽光電磁場を考えているが、所望の改質反応を選択的に高効率で行うための投入波長を本結果から算定することもできる。本実験では、まず基本的な改質反応機構を把握するため、分子線 (molecular beam) 装置を用いて、反応生成種の特定とその改質係数の測定を行った。すなわち、分子線装置 (Kato and Lee, 1997) の膨張室 (圧力 $\sim 10^{-1}$ Pa) 内にプラズマ反応炉を設置し、そこへ CO₂ 単一気体および (CO₂+H₂) 混合気体を超音速噴出させ、プラズマ反応炉において改質させる。反応生成種は 10^{-5} Pa 以下に減圧した分析室へ凍結状態で導入され、飛行時間 (TOF: Time of Flight) 法と四重極型質量分析計 (QMS: Quadruple Mass Spectrometer) を併用した計測システムにより化学種の特定とその改質係数が計測される。実験では CO₂ と H₂ の混合モル比およびプラズマ放電電圧を変化させて燃料種等への改質特性を調べるとともに、プラズマ反応促進

進種として Ar を試料気体に混入してその改質促進効果を検討した。その結果、プラズマ活性化効果により CO₂ を CO へ、また (CO₂+H₂) を CO, CH₄, CH₃OH へそれぞれ比較的容易にかつ良好な改質係数で変換できることを検証することができた。また、放電電圧および H₂ の混合比が各生成種の改質係数への強い影響因子であり、これによって CO, CH₄, CH₃OH 等の生成割合を制御できる可能性が明らかとなった。

1. 実験装置および方法

1.1 実験装置

Fig. 1 に本実験で用いた装置の概略を示す。装置本体は K-G (Kantrowitz-Gray) 型分子線装置を基本としており、膨張室、照準室、分析室は 3 室差動排気され、それぞれ実験時 $\sim 10^{-1}$ Pa, $\sim 10^{-4}$ Pa, $\sim 10^{-5}$ Pa の真空中に保たれている。膨張室にはプラズマ反応炉が設置されている。反応炉は熱電子放出用のカソード ($\phi 30$ mm) とアノード ($\phi 30$ mm) から成り、仕事関数を促進する BaO 膜を塗布したカソード表面は電気ヒーターにより約 900°C に加熱され、アノード間 (間隔 30 mm) に安定した直流グロー放電が保持される。プラズマ強度は両電極間の放電電圧 V_{ac} [V] を変化させることによって調整される。

試料気体は混合槽で所望のモル比に混合され貯気室 ($\sim 5 \times 10^3$ Pa, 290 K) に貯えられた後、オリフィス ($\phi 0.15$ mm) を通して $\sim 10^{-1}$ Pa に減圧された膨張室へ等エントロピー膨張して超音速噴流となってプラズマ反応炉へ導かれる。反応炉において試料気体はプラズマによって改質され、そこで生起された反応生成種は未反応種とともに円錐状スキマー ($\phi 2$ mm) によってコア部分が粒子線として抽出され、照準室へ導かれる。そこで反応生成種は自由分子流の超音速凍結状態を保持して、回転式チョッパーによってモジュレートされて高真空の分析室に入射する。入射した粒子線に含まれる化学種の特定と改質係数は TOF 法と QMS を併用した検出システムで計測される。

1.2 実験方法

実験は Table 1 に示すような条件下で行った。すなわち、試料気体の混合モル比割合 ($\chi_{CO_2} : \chi_{H_2} : \chi_{Ar}$) と放電電圧 V_{ac} を影響パラメーターとして種々変化させた。Ar はプラズマ反応促進粒子としてのペニングイオン効果を期待して試料気体に混合した (Nihon

[†] 1999 年 5 月 18 日受理

^{††} seizo@mach.mie-u.ac.jp

^{*} シャープ株式会社

^{**} 三菱重工業株式会社

Fig. 1 Schematic layout of the experimental apparatus

Table 1. Experimental conditions

No.	Molar fraction ratio of sample gases			Discharging voltage
	CO ₂	H ₂	Ar	V _{ac} [V]
1	1	—	—	120
2	1	1	—	100
3	1	1	—	200
4	1	4	—	200
5	1	1	1	100
6	1	1	1	150
7	1	1	1/2	150
8	1	1/5	1	70
9	1	1/5	1	100
10	1	1/2	1	100
11	1	1/2	1	150

Gakujutu Shinkoukai, 1992). なお、貯気槽の圧力は 5×10^3 Pa、温度は 290 K にほぼ一定に保った。

測定はいずれの実験においても各室の圧力と温度、およびプラズマ状態が一定の定常状態になった後に行うとともに、QMS 等の電氣的設定条件も常に同一に保った。なお、検出される化学種がプラズマ反応によって生成したものであるかを確認するため、各試料気体に対してプラズマ放電前の QMS 計測を行って反応化学種の特定と出力値の校正を行った。なお、QMS で検出される質量数 i の化学種に対する出力 $V_{out,i}$ [V] は入射される化学種の数流束 (number flux) に比例し、また TOF で検出される出力 $V_{out,i}$ - 飛行時間 t (flight time) 曲線から化学種 i の速度分布 (速度エネルギー分布) と巨視的流速を算出し、凍結状態か否かの判定を行った。

今後、改質プロセス解析に有益な中間生成体の分析を可能とするため、極微弱生成系信号でも検出できるフォトンカウンティングシステムを現有測定系に導入することを準備している。

2. 実験結果および考察

2.1 CO₂ 単一気体

(CO₂ + H₂) 混合気体を用いたプラズマ直接改質を実現するためには、化学的に安定な CO₂ がプラズマ中において CO₂ → CO + O 等に分解されることを確認しておく必要がある。そこで、CO₂ 単一気体のみを試料気体としたプラズマ熱分解の検証実験を行った。

Fig. 2 は CO₂ 単一気体の実験結果の一例を示す。(a) はプラズマ放電前の試料気体の質量分析結果であり、質量数 $m=44$ においてのみ出力 V_{out} が検出され、この化学種は CO₂ であることが特定できる。この試料気体を定常的に流しながら、プラズマ反応炉に設置されたアノードとカソードとの間に電圧を印加してプラズマ電離させた後、放電電圧 $V_{ac}=120$ V 一定で放電電流 $I_{ac}=25$ mA の定常状態にしたプラズマに維持し、そのプラズマ電離場中を CO₂ が通過したときに生じられる化学種を測定した結果が (b) である。図から明らかなように、質量数 $m=28$ と 44 において出力信号が得られ、それぞれの化学種が CO と CO₂ であることが特定される。これによって CO₂ → CO + O のプラズマによる分解が生起していることがわかる。このことは CO₂ の出力電圧が (a) より減少していることから確認できる。

しかし、 $m=16$ の O (酸素原子) および $m=32$ の O₂ は検出されていない。これは、O は非常に活性で反応性に富んでおり、O 単独で飛行する間に多く存在している未分解の中性 CO₂ と衝突して CO₃ 等へ移行している可能性がきわめて高い (Nihon Gakujutsu Shinkoukai, 1992) と思われる (本実験で用いた QMS で検出できる質量数は $m < 60$ であったため、CO₃ は検出できなかった)。また、O₂ が検出されるには O どうしの衝突が必要であるが、O の数密度が極めて小さいことを考えると、O + O → O₂ が生起する確率はほとんどないことから、O₂ は検出されなかったものと思われる。

(c) は各化学種の改質係数 (COR: Coefficient of Reforming) であり、ここでは $COR_i = (V_{out,i})_{after} / (V_{out,CO_2})_{before}$ すなわちプラ

Fig. 2 Plasma direct mass conversion of CO₂ pure gas

ズマ放電後に検出される化学種 i の出力 ($V_{out,i}$)_{after} をプラズマ放電前の CO₂ の出力電圧 (V_{out,CO_2})_{before} で除した値と定義した。図より、CO₂ から CO への改質係数は約 60% とかなりの高効率で改質できることがわかる。

2.2 (CO₂+H₂) 混合気体

前述の CO₂ → CO+O の分解が本実験の直流グロー放電によって比較的高効率で可能であることが検証できたので、H₂ を混入した (CO₂+H₂) 混合気体を試料気体としてプラズマ直接改質反応を試みた。Fig. 3 はその実験結果の一例である。混合モル比は $\chi_{CO_2} = \chi_{H_2} = 0.5$ すなわち (CO₂ : H₂ = 1 : 1) で $V_{ac} = 200$ V, $I_{ac} = 60$ mA の場合である。

Fig. 3(a) はプラズマ放電前の (CO₂+H₂) 混合気体に対する QMS の検出結果を示す。当然のことながら、 $m = 44$ の CO₂ と $m = 2$ の H₂ に対して信号出力が得られている。ここで、CO₂ と H₂ はほぼ同一の混合モル比であるのに関わらず H₂ に対する出力値が小さいが、これは QMS の出力が粒子数流束 (mass flux) に比例するから、その出力 V_{out,H_2} に両粒子速度の比 $\sqrt{m_{CO_2}/m_{H_2}}$ を乗じて修正するとともに、質量が小さい H₂ は QMS の Ionizer 中を高速で飛行するため十分なイオン化ポテンシャルを付与できないためであり、これらを考慮して修正すると両者の出力値はほぼ同一となる。Fig. 3(b) は $V_{ac} = 200$ V, $I_{ac} = 60$ mA のプラズマ電離場中を通過させた後に生成される化学種とその出力値を示す。図より明らかなように、 $m = 44, 32, 28, 16, 12$ の質量数において出力信号が得られている。 $m = 44$ と 2 はそれぞれ CO₂ と H₂ による出力であり、放電前よりも放電後における出力値が共に大きくなっている。これは QMS の Ionizer で試料気体中の未分解及びプラズマ中で再合成された中性の CO₂ や H₂ だけでなく、プラズマ中でイオン化された状態を保って Ionizer まで入射してくる CO₂ や H₂ が加わるためで、とくに後者のイオン状態の粒子が

Fig. 3 Plasma direct mass conversion of (CO₂ : H₂ = 1 : 1) mixture into CO, CH₄, CH₃OH at $V_{ac} = 200$ V and $I_{ac} = 60$ mA

なり多く存在しているものと思われる。次に、 $m = 28$ における出力は CO で、CO₂ の分解によって生じた化学種であることは明らかである。また、 $m = 16$ において出力される化学種は O または CH₄ が考えられるが、CH₄ である可能性が最も高いと特定される。これは、O が 2.1 でも検出されなかったように、O は極めて活性で他の化学種と結びつきやすく単独では検出器まで飛行することが困難であること、CH₄ はプラズマにより (CO₂+H₂) から分解・合成され得ること、などの理由による。さらに、 $m = 32$ における出力信号は O₂ または CH₃OH が考えられるが、CH₃OH である可能性が最も高いと特定される。これは、O₂ を生成する O の存在が極めて薄く、仮に O₂ が合成されたとしても本プラズマ強度においては O に再分解されてしまう可能性が高いこと、前述のように CH₄ が生成されているものとすれば CH₄+O → CH₃+OH → CH₃OH となる O と OH がそれぞれ関与する合成プロセスが考えられること (Yamamoto and Kato, 1998)、などの理由による。

以上より、(CO₂+H₂) 混合気体から直流グロー放電プラズマ反応により CO, CH₄, CH₃OH の燃料種へ直接改質できることが実験的に検証できたものと思われる。これら燃料種への改質係数は Fig. 3(c) より $V_{ac} = 200$ V の場合、 $COR_{CO} \sim 0.25$, $COR_{CH_4} \sim 0.19$, $COR_{CH_3OH} \sim 0.27$ であり、比較的良好な改質係数を示している。なお、 COR_{H_2} と COR_{CO_2} はそれぞれのプラズマ放電後の出力を放電前のもので除しているため、1 より大きな値を示している。

Fig. 4 は Fig. 3 とは異なる条件において得られた CO, CH₄, CH₃OH への改質係数を示す。(a) は放電電圧の影響を調べるため $V_{ac} = 100$ V ($I_{ac} = 60$ mA で Fig. 3 と同じ) 下で、(b) は混合モル比の影響を調べるため (CO₂ : H₂ = 1 : 4) の混合気体を用いた場合

Fig. 4 Coefficient of Reforming of (CO₂+H₂) mixtures into CO, CH₄ and CH₃OH

($V_{ac}=200$ V で Fig. 3 と同じ) である。(a) から明らかなように、 $V_{ac}=100$ V に減少させると各改質係数は $COR_{CO} \sim 0.25$, $COR_{CH_4} \sim 0.10$, $COR_{CH_3OH} \sim 0.08$ と Fig. 3 の $V_{ac}=200$ V に対する場合と比較して、CH₄ と CH₃OH、とくに CH₃OH の改質係数が低下することがわかる。すなわち、 $V_{ac}=200$ V の場合には放電電圧が高いためカソードから放出された電子が $H_2 \rightarrow 2H$ の分解により多く関与する結果、CH₄ の生成を促進するとともに、CO₂ $\rightarrow$ CO+O の分解で生じられる O が CH₄+O $\rightarrow$ CH₃+OH で表わされる CH₄ の H 引き抜き反応を活性化させて、OH ラジカルを多数発生させる結果、CH₃+OH $\rightarrow$ CH₃OH なる反応を促進させる結果、CH₃OH への改質係数を高めたものと思われる。次に、Fig. 4(b) に示すように、H₂ の混合比を増加させると V_{ac} は Fig. 3 と同じ放電電圧であるが、 $I_{ac}=40$ mA と低下しており ($I_{ac}=60$ mA に増加させるには $V_{ac}>200$ V に設定する必要がある)、各改質係数は $COR_{CO} \sim 0.16$, $COR_{CH_4} \sim 0.14$, $COR_{CH_3OH} \sim 0.15$ といずれも減少している。これは、カソードからの放出電子が相対的に H₂ の励起とイオン化に費やされ、CH₄ や CH₃OH を生じさせる主因子となる CO₂ の分解への寄与率が減少したものと考えられる。

2.3 Ar による改質係数の向上化

前節で (CO₂+H₂) 混合気体が CO, CH₄, CH₃OH の燃料となりうる化学種へプラズマ直接改質できることを実験的に検証した。本節では、改質をさらに高効率で促進させる目的で、Ar 分子を (CO₂+H₂) 試料気体に混入して、その改質係数の向上化実験を行った。

Fig. 5 は (CO₂+H₂) にさらに Ar を混入した (CO₂:H₂:Ar = 1:1:1/2) 混合気体に対する CH₄, CH₃OH への改質係数の実験結果例を示す。 $V_{ac}=150$ V, $I_{ac}=60$ mA の場合であるが、 $COR_{CH_4}=0.30$, $COR_{CO}=0.24$, $COR_{CH_3OH}=0.20$ が得られ、Fig. 4(a) に示した (CO₂:H₂=1:1), $V_{ac}=100$ V, $I_{ac}=60$ mA の場合の各 COR_i の値と比較して、 V_{ac} は 100 V $\rightarrow$ 150 V, CO₂ の χ_{CO_2} は 0.5 $\rightarrow$ 0.4 と異なる条件ではあるが、両者の影響が互いに逆作用することを考えると、Ar の反応促進効果が、とくに CH₄ と CH₃OH の改質係数がかなり増加していることから明らかである。

Fig. 5 Effect of Ar seeding as plasma reactivity reagents

Fig. 6 Time of flight diagram of Ar seeded in test mixture after plasma discharging

Fig. 7 COR improvement by Ar reagents, depending on mixture fraction, discharging volt and current

Fig. 6 は Fig. 5 の実験時に得られた Ar の TOF 信号を示すが、2つのピークが確認される。短時間側のピークはプラズマ反応により生成した Ar⁺ であり、長時間側のピークは準安定状態の励起 Ar* であることが筆者らによって検証されている (Kato *et al.*, 1990)。このことより、試料気体に添加された Ar はプラズマ電離場中で準安定状態の Ar* となり、この Ar* が他の粒子と衝突して

イオン化を促進するベニング効果をもたらし、これによって CO₂ や H₂ の分解反応が活発化し、その結果燃料種への改質係数が向上化しているものと推察される。

Fig. 7 はプラズマ改質における Ar の改質係数の向上化効果を調べる目的で、種々の条件下で行った CH₄, CO, CH₃OH への改質係数の実験結果を示す。ここでは、CO と Ar の混合比率を 1 : 1 とし、H₂ の混合比率を 1/5, 1/2, 1 と変化させた。

(a) は (CO₂ : H₂ : Ar = 1 : 1/5 : 1) の混合気体に対するものであり、V_{ac} = 70 V と Ar を混入しなければプラズマ改質が困難と思われる低電圧においてもプラズマ放電し、I_{ac} = 35 mA の放電電流が安定的に流れ、COR_{CH₄} = 0.22, COR_{CO} = 0.19, COR_{CH₃OH} = 0.06 の改質係数が得られている。一方、V_{ac} = 100 V と高くすると、I_{ac} = 60 mA と増加するとともに、COR_{CH₄} = 0.28, COR_{CO} = 0.20, COR_{CH₃OH} = 0 となり、V_{ac} = 70 V で得られていた CH₃OH への改質相当分が CH₄ への改質へ振り向けられた結果となっている。これは V_{ac} の増加による I_{ac} の増加、すなわち熱電子の放出量と運動エネルギーの増大により CH₃OH を再分解させ、結果として CH₄ 生成反応が進行したものと推測される。

(b) は (CO₂ : H₂ : Ar = 1 : 1/2 : 1) に対する結果であり、V_{ac} = 100 V と 150 V の場合の両者を比較すると、V_{ac} が 100 V → 150 V と増加させると I_{ac} が 50 mA → 90 mA と著しく増加しているが、これは CH₄ の改質係数増加が 0.20 → 0.38 と顕著であることから H₂ のイオン化がかなり促進された結果と思われる。すなわち、H₂ の混合割合を増加させた場合、V_{ac} を増加させると H₂ のイオン化がより進み、これによって CH₄ の生成反応がまず促進され、次いで CH₃OH の生成も追従することがわかる。

(c) は (CO₂ : H₂ : Ar = 1 : 1 : 1) に対する結果であるが、(b) と比較すると同じ V_{ac} であっても I_{ac} はかなり増加している。各改質係数も全体的に増大するが、とくに CO と CH₃OH の増加が顕著である。このことから、H₂ のイオン化がさらに促進される結果、(a) と (b) よりもカソードから放出される熱電子だけでなく、多くの H⁺ が関与できるようになり、CO₂ → CO + O, CO → C + O, H₂ → H + H, C + 4 H → CH₄, CH₄ + O → CH₃ + OH → CH₃OH などの分解・合成の反応が容易となった結果、CH₃OH の改質係数が増加したことが推察される。したがって、CH₃OH の高改質化には H₂ の混合比を CO₂ と同程度以上にすることが望ましいようである。

結 論

CO₂ を再利用する可能性を探る目的で、(CO₂ + H₂) 混合気体をプラズマによって CO, CH₄, CH₃OH へ直接改質する検証実験を試みた。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) プラズマにより CO₂ → CO + O の分解を比較的高効率で行うことができる。
- (2) (CO₂ + H₂) 混合気体をプラズマ改質によって CO, CH₄, CH₃OH の燃料化学種へ直接合成することができ、その改

質係数も比較的高い。

- (3) CH₄, CH₃OH のプラズマ合成に対しては、プラズマ放電電圧を高くするとともに、Ar 等の反応活性種を添加することによって、それらの改質係数を向上させることができる。
- (4) CO₂ に対する H₂ の混合割合を 1 より小さくすると、CH₄ の改質係数が増加する。また、逆に 1 より大きくすると、CH₃OH の改質係数が増加する。
- (5) CO₂/H₂ 系の反応過程を推測すると以下に示す逐次反応の可能性が高いと考えられる。

なお、今回の実験より得られた CO, CH₄, CH₃OH の生成量から算出される燃焼エネルギー量を、放電やカソードの加熱によるプラズマ発生の投入エネルギー量で除した改質エネルギー効率を概算すると 10% 程度であった。これを一段と向上させるための方策として、(1) OH ラジカルの生成をより小さい投入エネルギーで可能とする H₂O を H₂ の代わり用いること、(2) プラズマ反応室を段階的に素反応に必要なエネルギーを適切に投入することにより、反応を高効率で生じさせること、(3) CO₂ の大量処理に向け、常温常圧下での高パルス放電による非平衡プラズマを発生させること、(4) 太陽光電磁場等による低廉なエネルギー源を用いること、などを現在検討している。

Nomenclature

- COR = coefficient of reforming [—]
- I_{ac} = the current impressed between the two electrodes [mA]
- m = mass number [—]
- V_{ac} = the voltage impressed between the two electrodes [V]

Literature cited

Kato, S. and S. J. Lee ; “Experimental Study on Plasma-assisted Mass Conversions of CO₂ Pure and (CO₂ + H₂) Mixture Molecules,” *Microscale Thermophysical Eng.*, **1**, 245-251 (1997)

Kato, S., M. Katagiri and S. Ito ; “A Characteristic Study of Particle Beams Skimmed from Plasma Ionized Flow Fields with Neutral Argon Charges Using the Time-of-Flight Mass-Spectrometer Technique,” *Transaction of JSME*, **B**, **56**, 1251-1257 (1990)

Nihon Gakujutsu Shinkoukai ed. ; *Purazuma zairyoukagaku handobukku*, p. 9-29, Ohmusa, Tokyo, Japan (1992)

Shibusaki, T. ; “Global Environmental Issues and their Countermeasures -Separation, Utilization and Disposal of CO₂,” *J. of ASME*, **98**, 247-250 (1995)

Yamamoto, Y. and S. Kato ; “Quantum Chemistry Analysis of Plasma Reaction and its Visualization,” *Journal of the Visualization Society of Japan*, **18**, 207-211 (1998)

Mass Conversions of CO₂ with the Aid of Plasma Reactions (Feasible Experiments into Fuel-like Species)

SEIZO KATO, MOTOHIRO OKUYAMA*, KAZUAKI KUMURA** and TAKESHI HARA

Department of Mechanical Engineering, Mie University, Mie 514-8507

Key words: particle dynamics, plasma reaction, CO₂-reforming and direct mass conversion.

CO₂ management technology is one of the most important issues for the global environment. This paper describes the feasibility experiment that CO₂ can be reformed by direct conversion into fuel-like species with the aid of plasma reactions. Here, CO₂ pure gas and (CO₂+H₂) are discharged into an expansion chamber raising a plasma reaction furnace and the chemical species produced by plasma direct mass conversion are detected by a combined time-of-flight and mass spectrometer technique. As a result, fuel-like species such as CO, CH₄, CH₃OH are obtained with fairly good COR (Coefficient of Reforming), which is getting better by adding Ar molecules as activating reagents.

~~~~~

* SHARP Corporation

** Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.