

化学プロセス(1,000℃以上)に用いる 耐熱性セラミックス担体

New Ceramic Support Material for Chemical Process above 1,000℃

1,000℃以上の高温で運転される触媒燃焼器の開発が進められている。このような高温下で触媒を使用するためには、耐熱性に優れた触媒用担体の開発が必要となった。

種々のセラミックス系担体を試作した結果、1,200℃の高温でも37m²/gの高い比表面積をもつランタン・ベータ・アルミナ(La₂O₃・11Al₂O₃)の開発に成功した。本担体を用いたPd触媒の耐久性を調べた結果、1,200℃で1,000時間メタンを安定燃焼させることができた。

本開発によるランタン・ベータ・アルミナは、触媒燃焼器のほかに、高温水蒸気改質による水素製造、部分燃焼による還元性ガスの製造など、高温化学プロセスに用いる触媒用担体として広範囲に使用できる。

山下寿生* Hisao Yamashita
加藤 明** Akira Katô
川越 博** Hiroshi Kawagoshi
松田臣平* Shimpei Matsuda
岩井一躬*** Kazumi Iwai

1 緒 言

近年、材料革新に伴い高温下で実施されるプロセスが種々の分野で実現しつつある。触媒を用いる化学工業でも1,000℃以上の高温で運転されるプロセスが高効率化、耐環境性の観点から注目されている。その例として触媒燃焼式ガスタービン^{1),2)}あるいはリホーマ³⁾がある。また従来850℃前後で運転されていた水素製造プラント、低カロリーガス排熱回収、自動車用コンバータなど既に実用化されたプロセスでも更に高温化することが望まれている。

図1に、各種化学プロセスでの触媒の使用上限温度を示す。現在実用化されているもののなかで、最も高い温度で使用されているものは自動車用コンバータであるが、その温度はたかだか850℃である。これに対して現在開発が進められている触媒燃焼式のリホーマでは950～1,100℃、ガスタービンでは1,100～1,300℃に達する。このような高温下で触媒が使用される場合、その耐熱性が重要な問題となる。触媒は多孔質物質であるから、ここでいう耐熱性とは、高温にさらされても多孔性(高比表面積)を維持することを意味する。

本稿は、これまで高温触媒用の担体として用いられてきたアルミナに代わる新しい耐熱性セラミックス担体の開発、及びこれを用いた高温化学プロセスについて述べたものである。

2 ランタン・ベータ・アルミナ担体

触媒は通常アルミナ(Al₂O₃)、シリカ(SiO₂)、チタニア(TiO₂)などの多孔質担体に白金(Pt)やパラジウム(Pd)などの活性成分を保持したものが使われている。この場合、担体の比表面積が大きいものほど活性成分は高分散され、高活性を示す。しかし、触媒を高温で使用すると、担体がシンタリング(半融)して比表面積は減少する。これに伴って担体上に保持された活性成分の微粒子が凝集し、活性点は減少する。

図2に従来燃焼触媒として用いられているPd-Al₂O₃触媒を高温下で加熱処理したときの物性変化を示した。800℃の加熱処理ではアルミナの一次粒子は110Åであり、比表面積は130m²/gをもつ。しかし、1,200℃に加熱するとアルミナの一次粒子はシンタリングにより2,500Åと大きくなり、比表面積は5

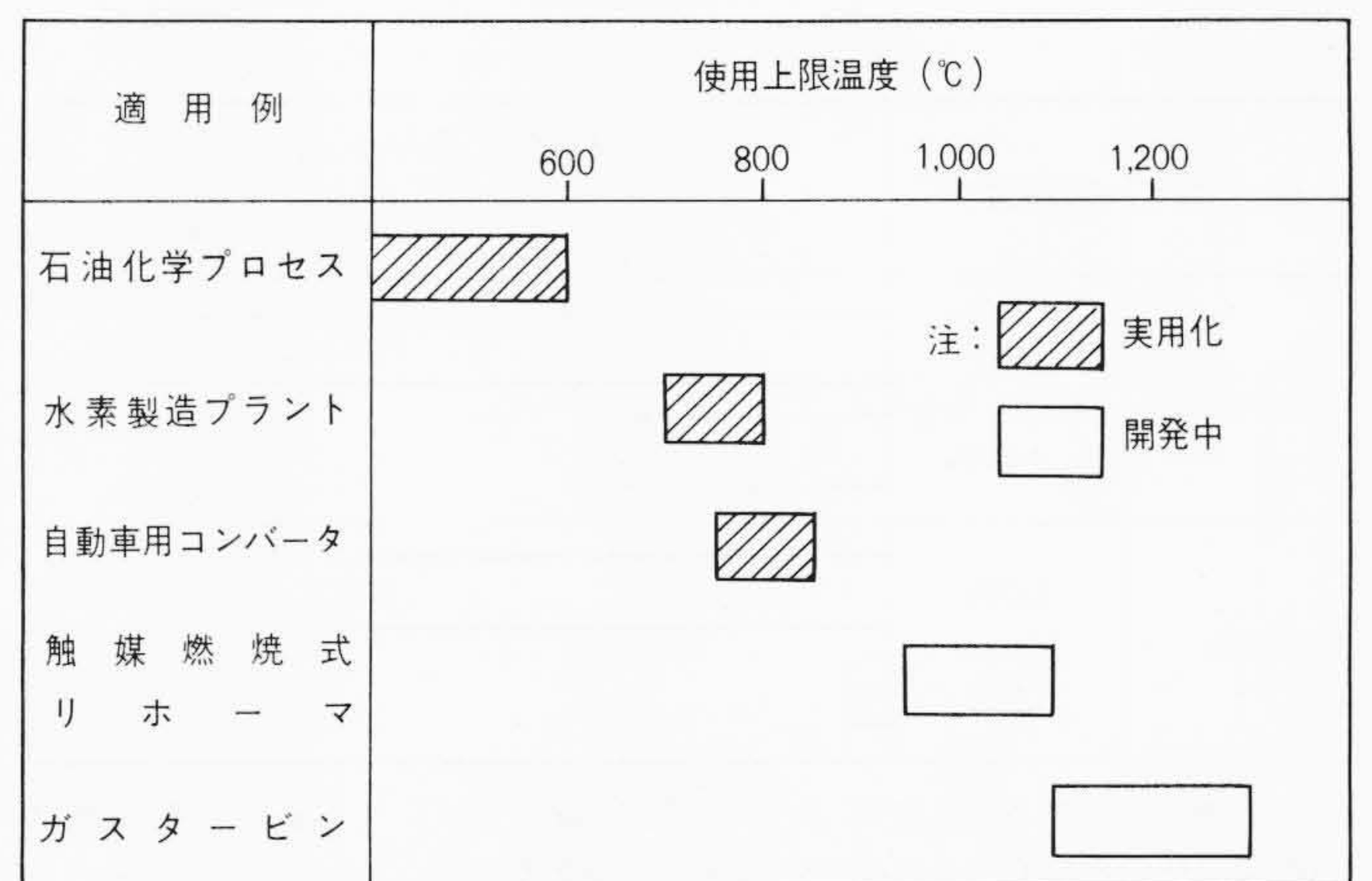


図1 化学プロセスでの触媒の使用上限温度 触媒燃焼式リホーマあるいはガスタービンでは、触媒は1,000℃以上で使用される。

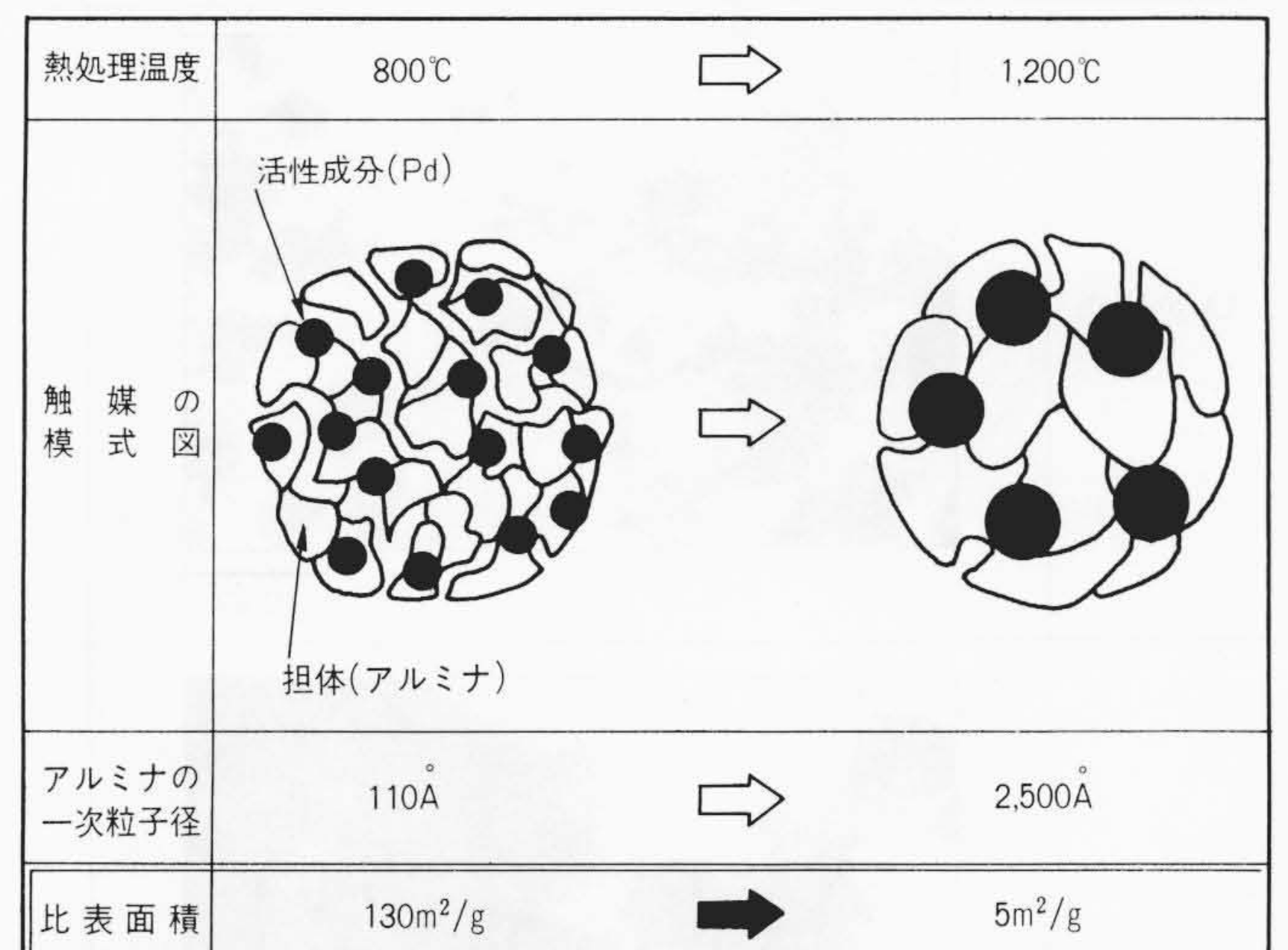


図2 高温熱処理による触媒の物性変化 従来のアルミナ担体は1,200℃で熱処理すると、比表面積が大幅に減少し、触媒の性能が失われる。

m²/gに減少してしまう。したがって、1,000°C以上の高温下でも触媒が働くためには、耐熱性に優れた担体を開発することが最も重要である。そこで日立製作所では、アルミナ、シリカ、ジルコニアなどのセラミックス系材料を用いて各種の担体を試作し、高比表面積をもつ物質の探索を行なった。その結果、アルミナと酸化ランタンを組み合わせた二成分系担体が高温で熱処理しても高比表面積をもつことが分かった⁴⁾。特にアルミニウムとランタンの組成比をAl/La=95/5(モル比)にした混合溶液に、アンモニア水を添加して得た共沈物を1,000°C以上で焼成すると、La₂O₃・11Al₂O₃で示されるランタン・ベータ・アルミナ(La・β・Al₂O₃)が生成し、これが高比表面積をもつ物質であることを見いだした。図3に、La・β・Al₂O₃及び従来のAl₂O₃担体の焼成温度による比表面積の変化を示す。1,000°C、1,200°C焼成とも、La・β・Al₂O₃のほうがAl₂O₃に比べ比表面積は大きい。特に1,200°C焼成では、Al₂O₃担体は5m²/gであるのに対し、La・β・Al₂O₃では37m²/gの高比表面積をもつことが分かる。

図4に1,200°Cで焼成したLa・β・Al₂O₃とAl₂O₃の粒子の電子顕微鏡写真と結晶構造⁵⁾を示す。La・β・Al₂O₃の粒子は

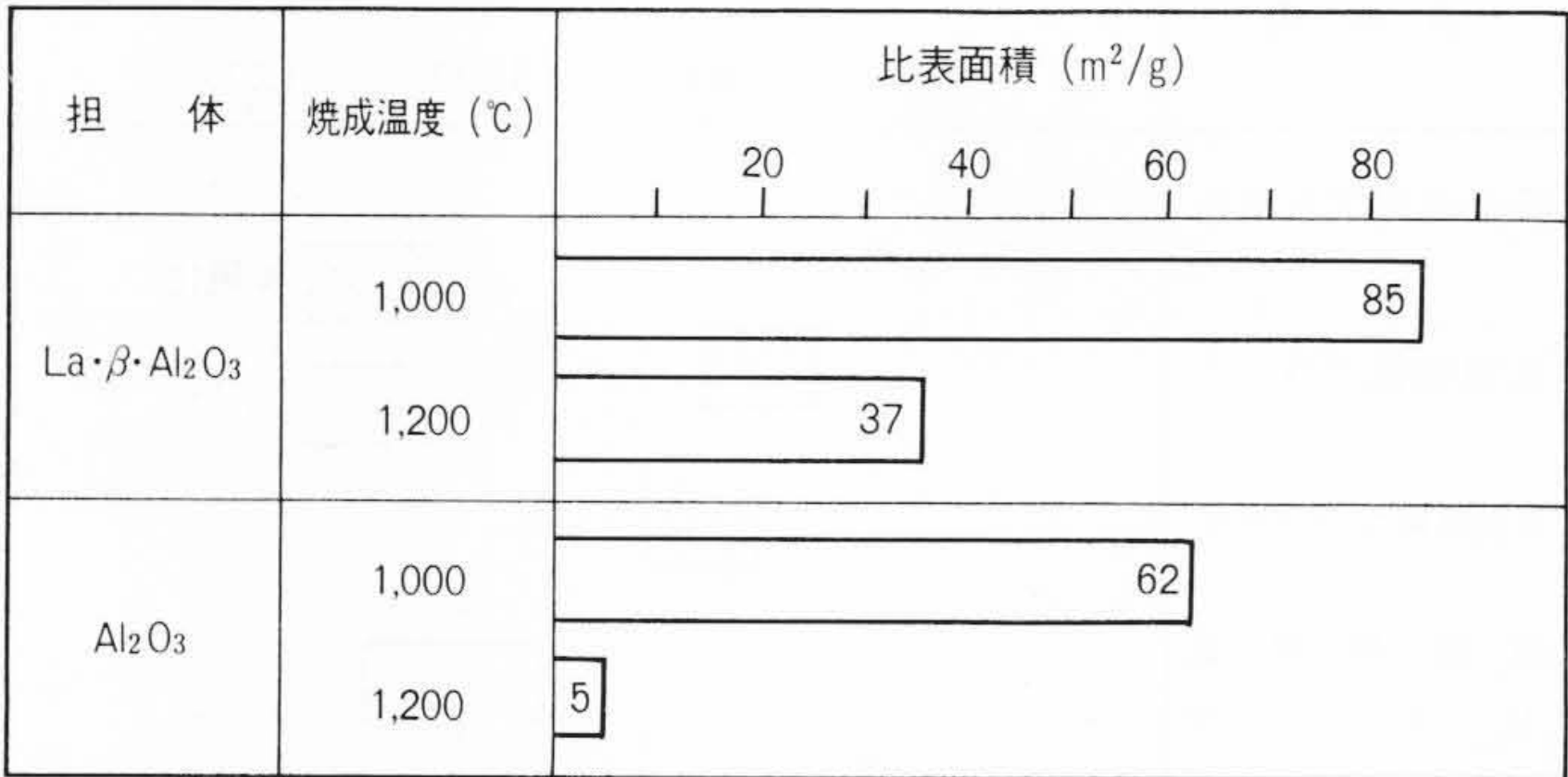


図3 担体の焼成温度による比表面積の変化 La・β・Al₂O₃担体は1,200°Cで熱処理しても、37m²/gの高比表面積をもつ。

300Å前後であるのに対し、Al₂O₃の粒子は2,000Å以上に結晶成長している。この結果からLa・β・Al₂O₃は、高温で熱処理しても焼結しにくく、比表面積が大きいことが分かる。La・β・Al₂O₃の結晶構造は同図に示すように立方最密充填された4段の酸素イオンの空間にAlイオンが存在するスピネルブロックを形成し、この層間にLaイオンが入り込んだ層状構造をもつ。このLaイオンがスピネルブロック間を切断し、垂直方向への結晶成長を抑制しているものと推定される。

3 Pd-La・β・Al₂O₃触媒の性能

共沈法で得られたLa・β・Al₂O₃の粉末をペレット状にした担体に活性成分としてPdを付けた触媒(Pd-La・β・Al₂O₃)の性能を調べた。図5に1,000°C及び1,200°Cで焼成したPd-La・β・Al₂O₃触媒と従来のPd-Al₂O₃触媒を用いて、メタンの燃焼実験を行なった結果を示す。Pd-Al₂O₃触媒では1,000°C焼成に対し、1,200°C焼成では活性低下が著しい。これに対しPd-La・β・Al₂O₃触媒では、1,200°C焼成の場合、1,000°C焼成に比べ若干の活性低下は認められるが、Pd-Al₂O₃触媒に比べその低下は小さい。一方、1,000°C、1,200°C焼成とも、Pd-La・β・Al₂O₃触媒はPd-Al₂O₃触媒に比べ高い活性を示す。特に1,200°C焼成では、Pd-La・β・Al₂O₃触媒はPd-Al₂O₃触媒に比べ、高活性を示すことが分かる。

次にPd-La・β・Al₂O₃触媒を用いて、1,200°Cでメタンを1,000時間連続燃焼し耐久性を調べた。燃焼試験は1,200°Cで焼成したPd-La・β・Al₂O₃触媒を断熱形反応管に充てんし、550°Cに予熱したメタン3%を含む空気を触媒層に導入して行なった。なお、比較のためにPd-Al₂O₃触媒も同時に試験したが、焼成温度を1,200°Cにしたものは活性が低く、同条件で測定できなかったため、1,000°C焼成の触媒を使用した。図6に燃焼温度1,200°Cでのメタン燃焼率及び触媒の比表面積の経時変化を示す。Pd-La・β・Al₂O₃触媒は反応開始直後で99.8%を示し、1,000時間後でも99.5%の燃焼率を維持した。これに対してPd-Al₂O₃触媒では反応開始直後では99.6%の燃焼

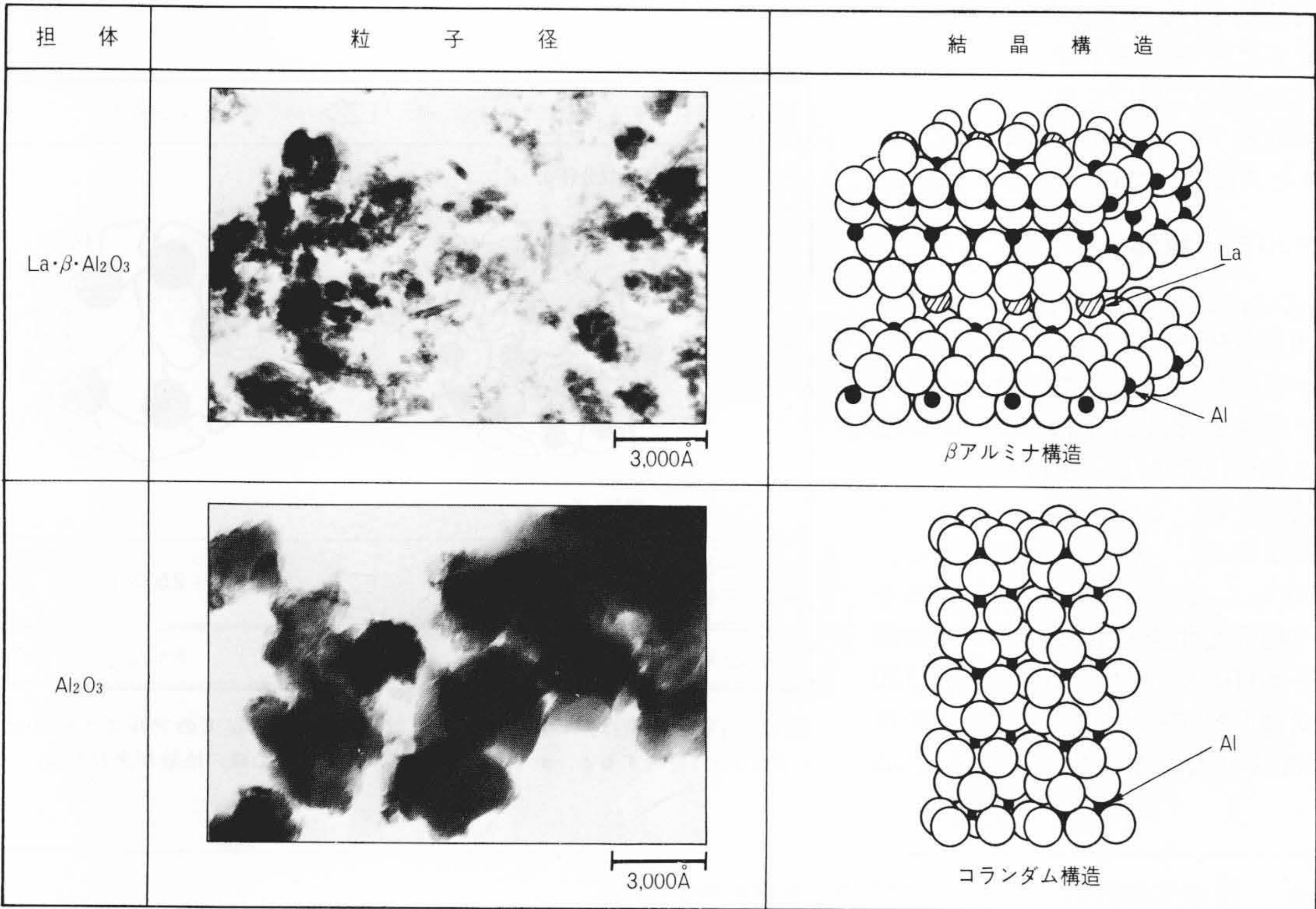


図4 担体の粒子径と結晶構造 1,200°C焼成でAl₂O₃の粒子径は2,000Å以上であるのに対し、La・β・Al₂O₃は300Å前後であり、微粒子で存在する。

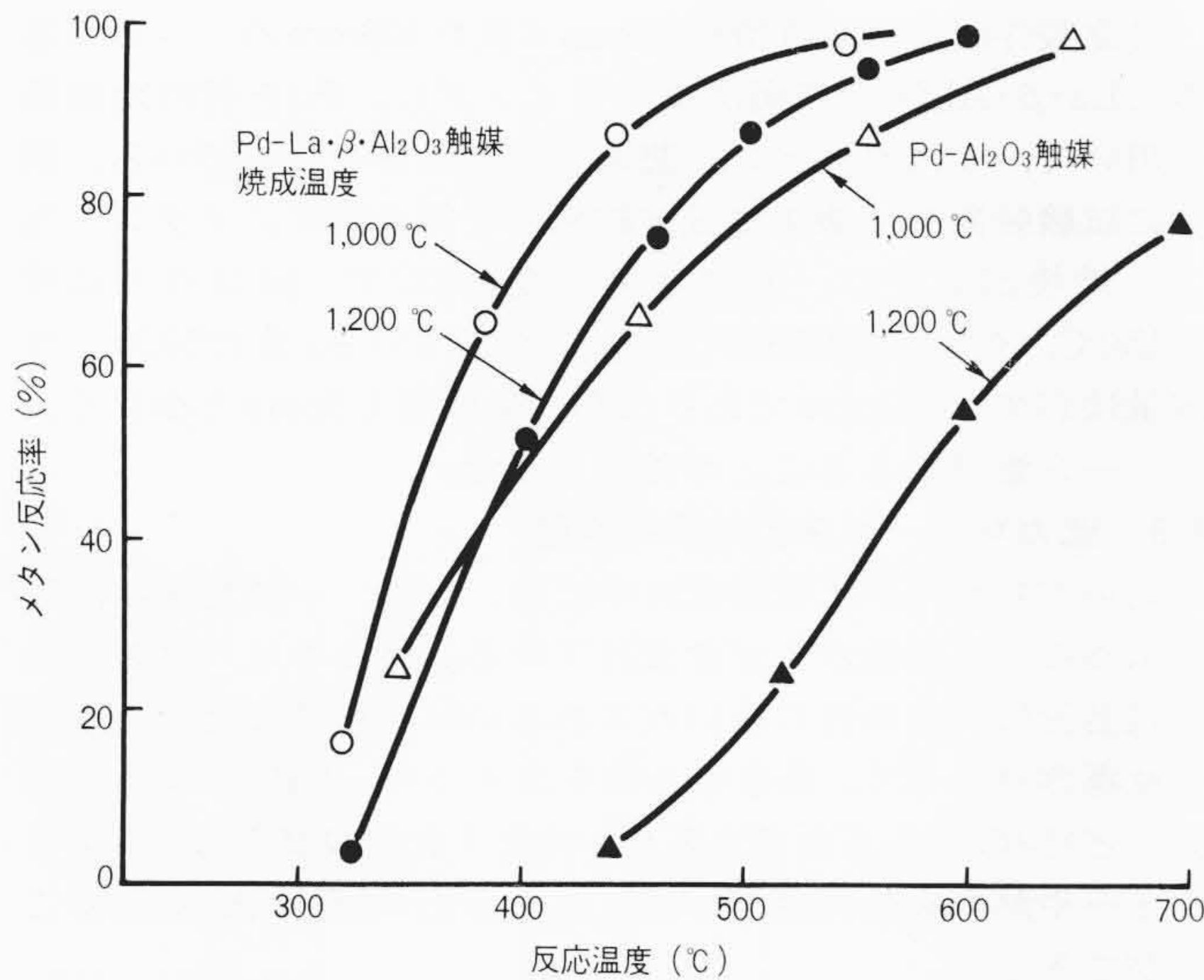


図5 開発触媒(Pd-La·β·Al₂O₃)の性能 Pd-La·β·Al₂O₃触媒は、従来のPd-Al₂O₃触媒に比べ高い活性を示す。

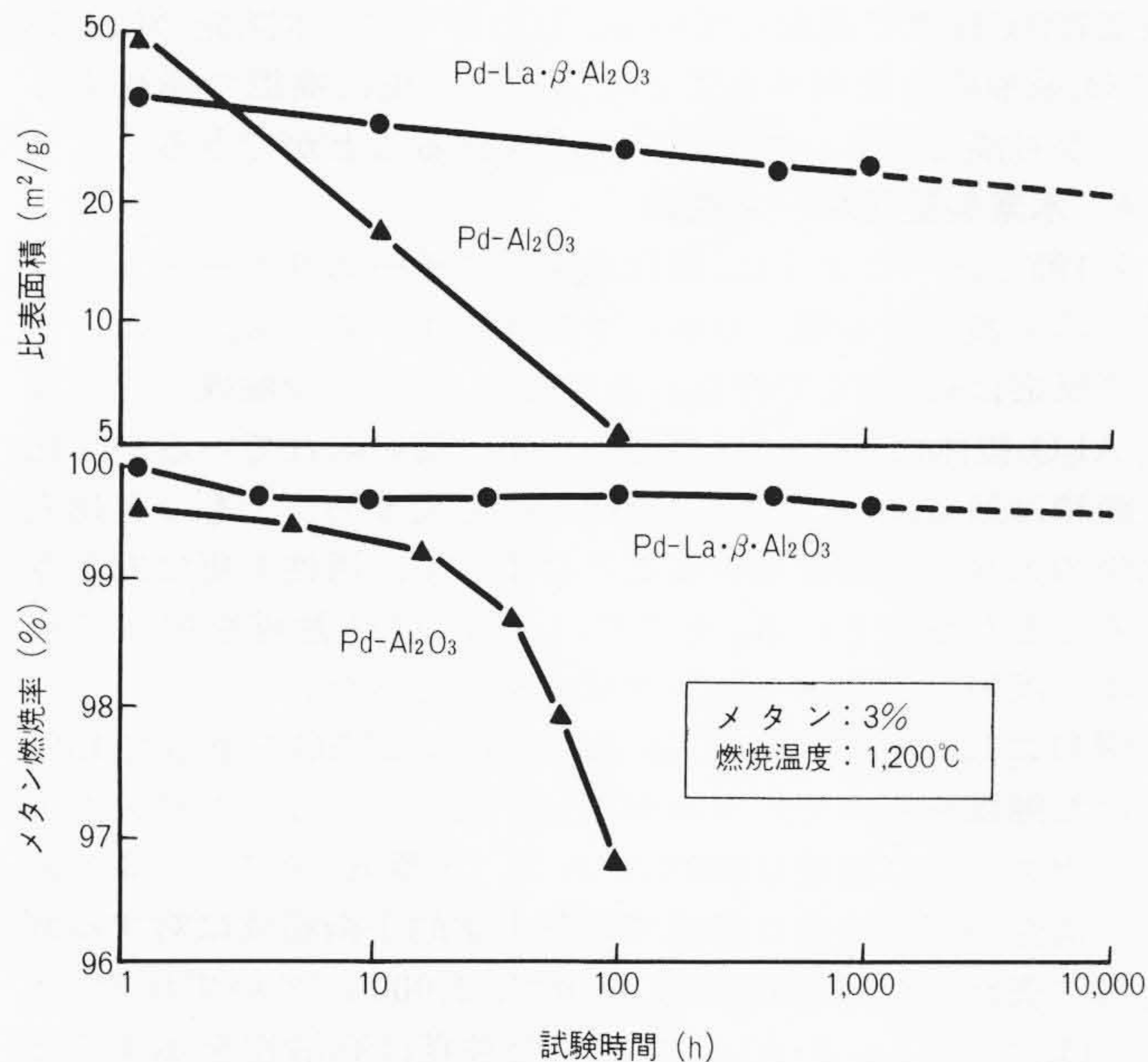


図6 メタン連続燃焼試験 Pd-La·β·Al₂O₃触媒を用いると、1,200℃で1,000時間メタンを安定に燃焼でき、耐久性に優れている。

率を示すが、10時間以降になるとしだいに低下し、100時間後では96.7%にまで低下した。一方、触媒の比表面積の経時変化をみると、Pd-La·β·Al₂O₃触媒では減少が少なく、1,000時間後でも24m²/gをもつが、Pd-Al₂O₃触媒では100時間後で既に5m²/gに減少する。以上の結果、Pd-La·β·Al₂O₃触媒は1,200℃のメタン燃焼で優れた耐久性を示すことが確認された。

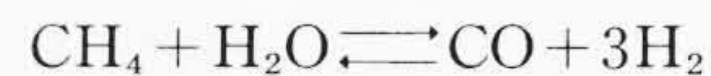
本実験結果から、Pd-La·β·Al₂O₃触媒の1万時間後でのメタン燃焼率を予測した。予測法としては1万時間後の比表面積を推算し、このときのメタン燃焼速度式から燃焼率を求めた。図6で示すように比表面積 $S(\text{m}^2/\text{g})$ の対数と時間 $t(\text{h})$ の対数がほぼ直線関係にあることから S を t の関数で表わすと、 $S=S_0t^{-0.063}$ となる。ここで S_0 は反応開始後1時間の比表面積の値であり、37m²/gである。この式から1万時間後の比表面積を求めると20.7m²/gとなる。この比表面積でのメタンの燃焼率を推算すると99.4%であり、1万時間後も高活性を維持することが分かった。

4 高温化学プロセスへの適用

耐熱性担体として開発したLa·β·Al₂O₃を高温化学プロセスへ適用する検討を行なっている。以下、その適用例について述べる。

4.1 触媒燃焼式リホーム

炭化水素をスチームリホーミングして水素を製造するプロセスは、石油製精プラント、都市ガスプラントに使用されている。最近では燃料電池発電プラントにも使用されようとしている。炭化水素のスチームリホーミング反応、例えばメタンと水蒸気の反応は次式のように進行する。



上記反応は吸熱反応であるため、外部から熱を供給し、リホーム触媒を加熱する必要がある。この加熱方式として従来のリホームでは、バーナ燃焼式が用いられているが、日立製作所では触媒燃焼式について開発を進めている。図7(a)に現在開発中の触媒燃焼式のリホーム構造を、同図(b)にPd-La·β·Al₂O₃触媒を用いてメタンを燃焼させたときのリホームの温度プロファイルを示す。300℃に予熱した水素4%を含む空気をリホーム下部に設置されたPd-La·β·Al₂O₃触媒に導入すると、水素の燃焼により触媒層は500℃に保持される。次いでメタンをガス中の濃度が3%になるように調整して、触媒層に導入する。メタンの燃焼により1,050℃の燃焼ガスが得ら

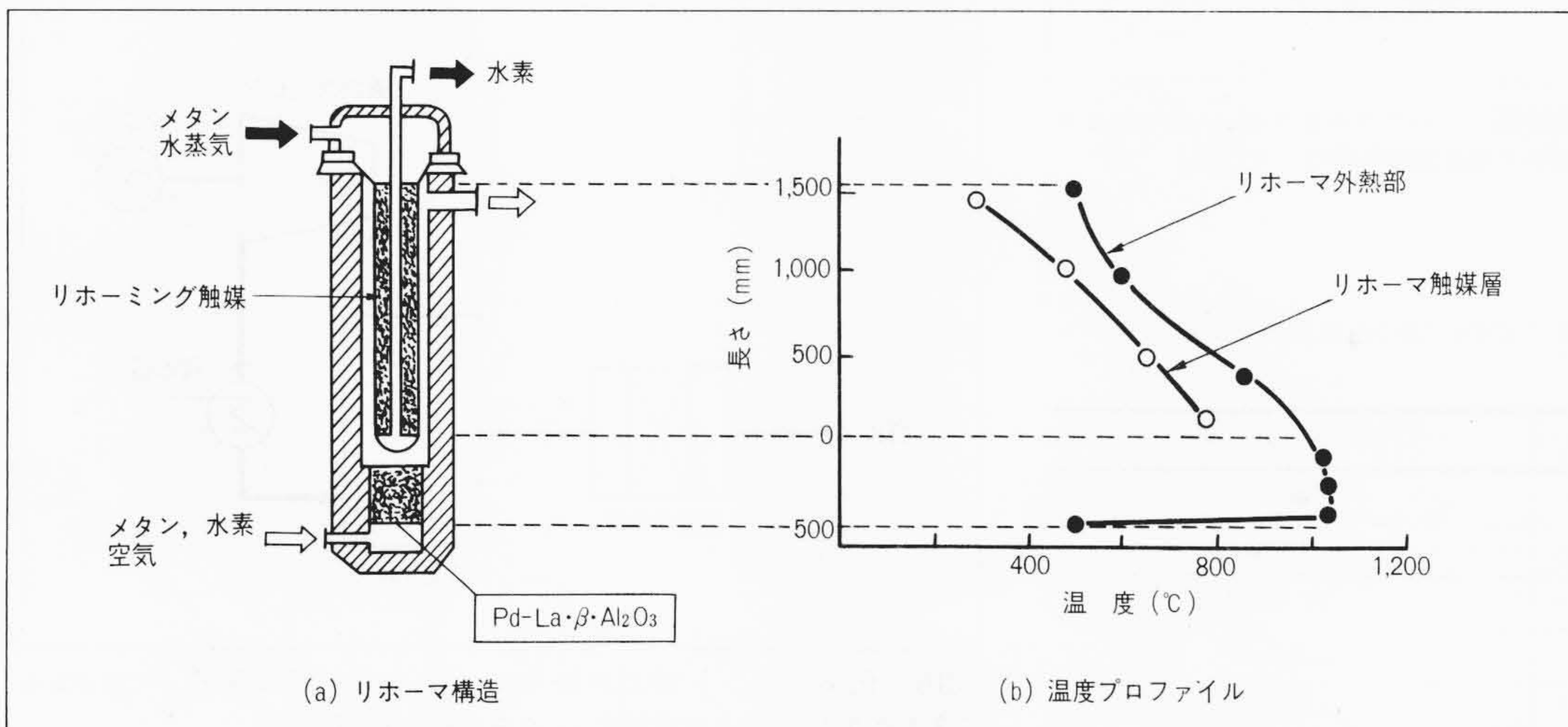


図7 触媒燃焼式リホーム 触媒燃焼法により、リホーム触媒は800℃に加熱され、スチームリホーミング反応が起こる。600時間運転中であるが、順調に稼働している。

れ、これにより、リホーマ触媒を800℃に加熱することができた。

本装置は現在約600時間の運転を行なっているが、順調に稼動中である。

4.2 触媒燃焼式ガスタービン

Pd-La・β・Al₂O₃触媒をガスタービン用燃焼器に適用するための基礎研究を行なっている。

図8に触媒燃焼法によるコンバインドサイクル発電システムの概念図を示す。現在のガスタービンはLNG(液化天然ガス)を燃焼器中でバーナ燃焼した後、二次空気を導入してガスタービンの入口温度を1,100℃程度にしている。これに対して触媒燃焼方式では、燃焼器中に触媒を充てんし、LNGと空気の子混合ガスを燃焼させる。触媒燃焼式ガスタービンは、バーナ燃焼に比べ燃焼温度が低く窒素酸化物の生成が著しく少ないため、超低NO_x(窒素酸化物)バーナとしての期待が大きい。

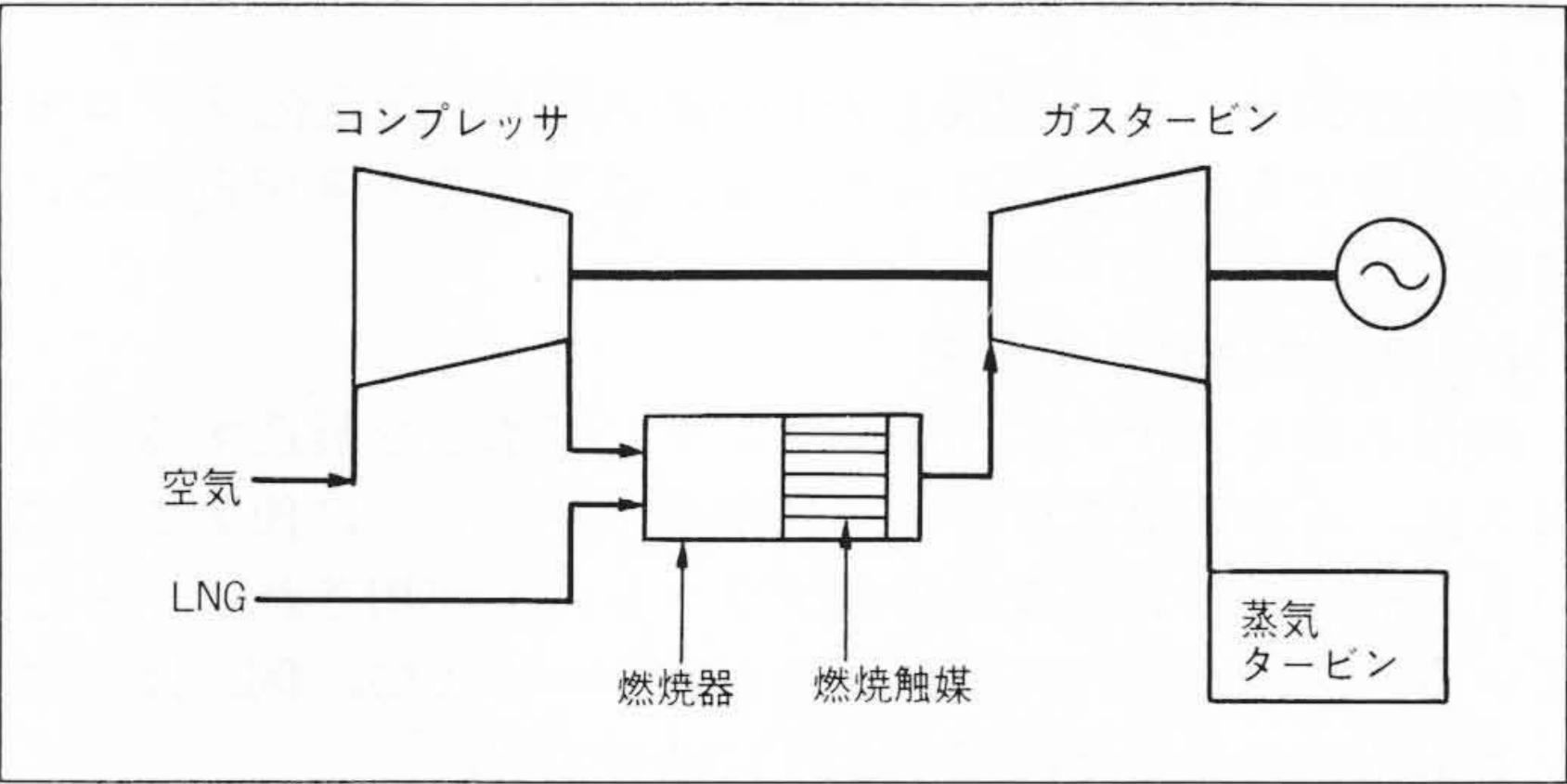


図8 触媒燃焼式ガスタービンシステム 触媒燃焼により高温ガスを
を得。NO_x(窒素酸化物)の発生が少ないことが本方式の最大の特徴である。

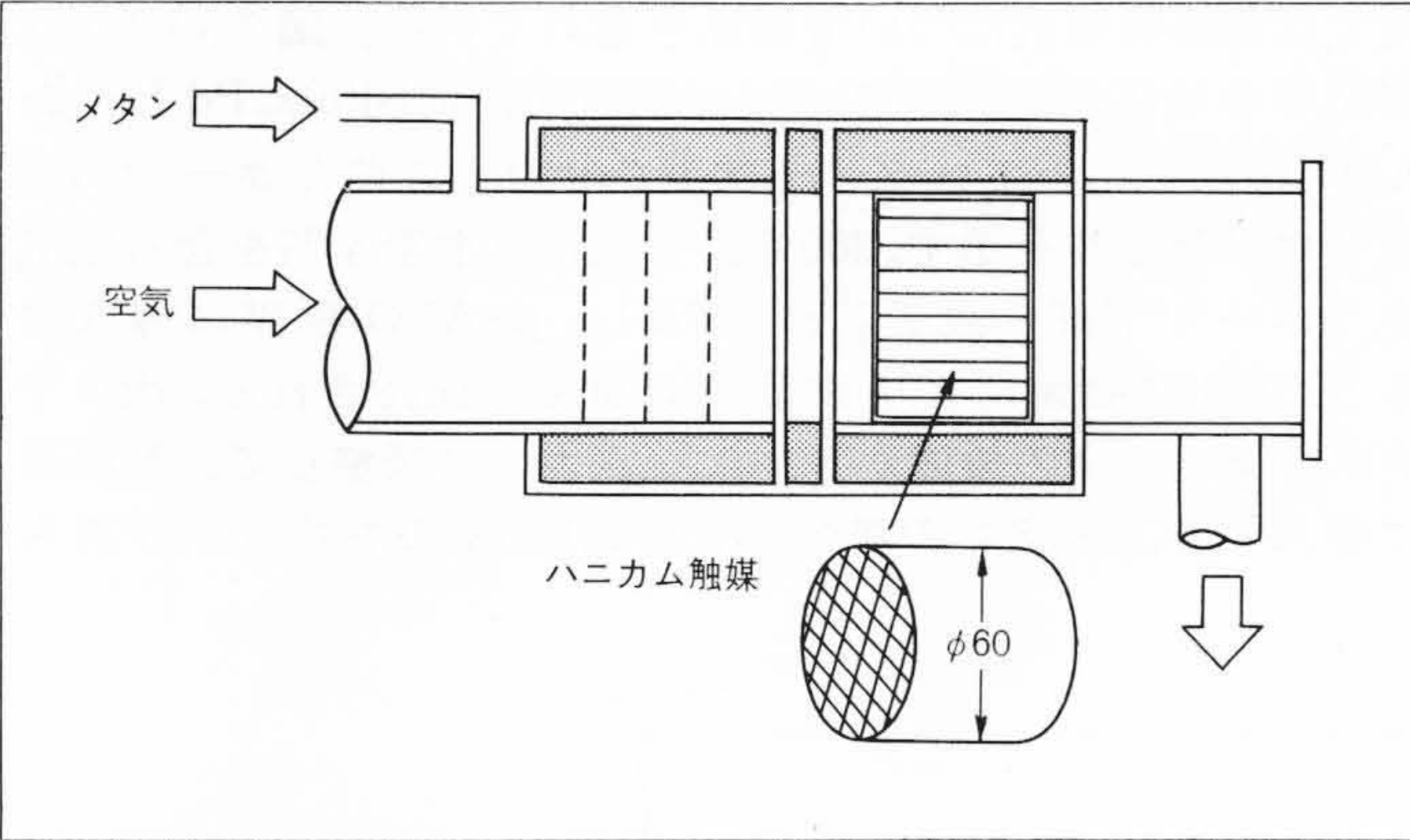


図9 ガスタービン用燃焼試験装置 ハニカム基体にLa・β・Al₂O₃をコー
ティングし、Pdを保持した触媒を用いて燃焼試験を行なっている。

表1 燃焼試験結果 触媒燃焼ではNO_x、COの生成量が少なく、クリーン
燃焼できる。

項 目	試 験 結 果
入 口 ガ ス 温 度	400℃
出 口 ガ ス 温 度	1,100℃
メ タ ン 燃 焼 率	99.9%
NO _x 生 成 量	1.2ppm
CO 生 成 量	3.0ppm

日立製作所では現在直径60mm×長さ100mmのハニカム基体にLa・β・Al₂O₃を表面にコーティングし、Pdを付けた触媒を用いて、ガスタービンを想定した実験を行なっている。図9に試験装置を、表1に試験結果の一例を示す。メタン3%での燃焼試験では、入口ガス温度400℃で、出口ガス温度1,150℃、メタン燃焼率99.9%以上を得ている。またNO_xの生成量はわずか1.2ppmであり、COの生成量も3ppmと少なく、クリーン燃焼できることが確認された。

4.3 低カロリーガス排熱回収装置

高炉ガスや化学工業排ガス中には、水素、一酸化炭素、炭化水素などの燃焼ガスが含まれている。低カロリーガス排熱回収装置は、自燃性のないガスあるいは自燃性に乏しいガスを触媒燃焼させて、発生する熱をエネルギー(電力、動力、蒸気など)回収するものである。このような回収装置は、省エネルギーや熱の有効利用及び排ガスの浄化(悪臭除去)を図ることができる。

図10に化学プラント排ガスからのエネルギー回収システムを示す。排ガス中に含まれる燃焼成分を触媒燃焼器中で燃焼し、その熱で蒸気を発生させ、蒸気タービンにより発電するシステムとなっている。現在では触媒の耐熱性を考慮して、最高700℃程度で運転している。したがって、本開発のLa・β・Al₂O₃系触媒を使用することによって、更に高温で運転することが可能となり、熱効率の向上を図ることができる。

4.4 水素製造用ホーマ触媒

4.1節で述べたように、炭化水素をスチームリホーミングして水素を製造する際、リホーマ触媒が用いられる。リホーミング反応は約800℃で行なわれており、リホーマ触媒としてはα-Al₂O₃担体にNiを付けたものが主に用いられているが、比表面積は通常20m²/g以下と小さい。したがって、もっと比表面積の大きい触媒を用いることによって、活性を更に向上させることが期待される。そこで、La・β・Al₂O₃触媒を用いてNi触媒を調製し、リホーミング反応を行なった。

図11にLa・β・Al₂O₃及びα-Al₂O₃担体にNiOを重量で15%付けた触媒を用いて、リホーミング反応を行なった結果を示す。ガスの入口温度は600℃であり、水蒸気/メタン=3である。活性の評価は出口温度での熱力学的平衡組成に対する到達度で表わした。空間速度1,000h⁻¹、2,000h⁻¹のいずれでもα-Al₂O₃に比べLa・β・Al₂O₃を用いた触媒は高活性を示すことが分かる。

La・β・Al₂O₃をスチームリホーミング反応に使用するもう

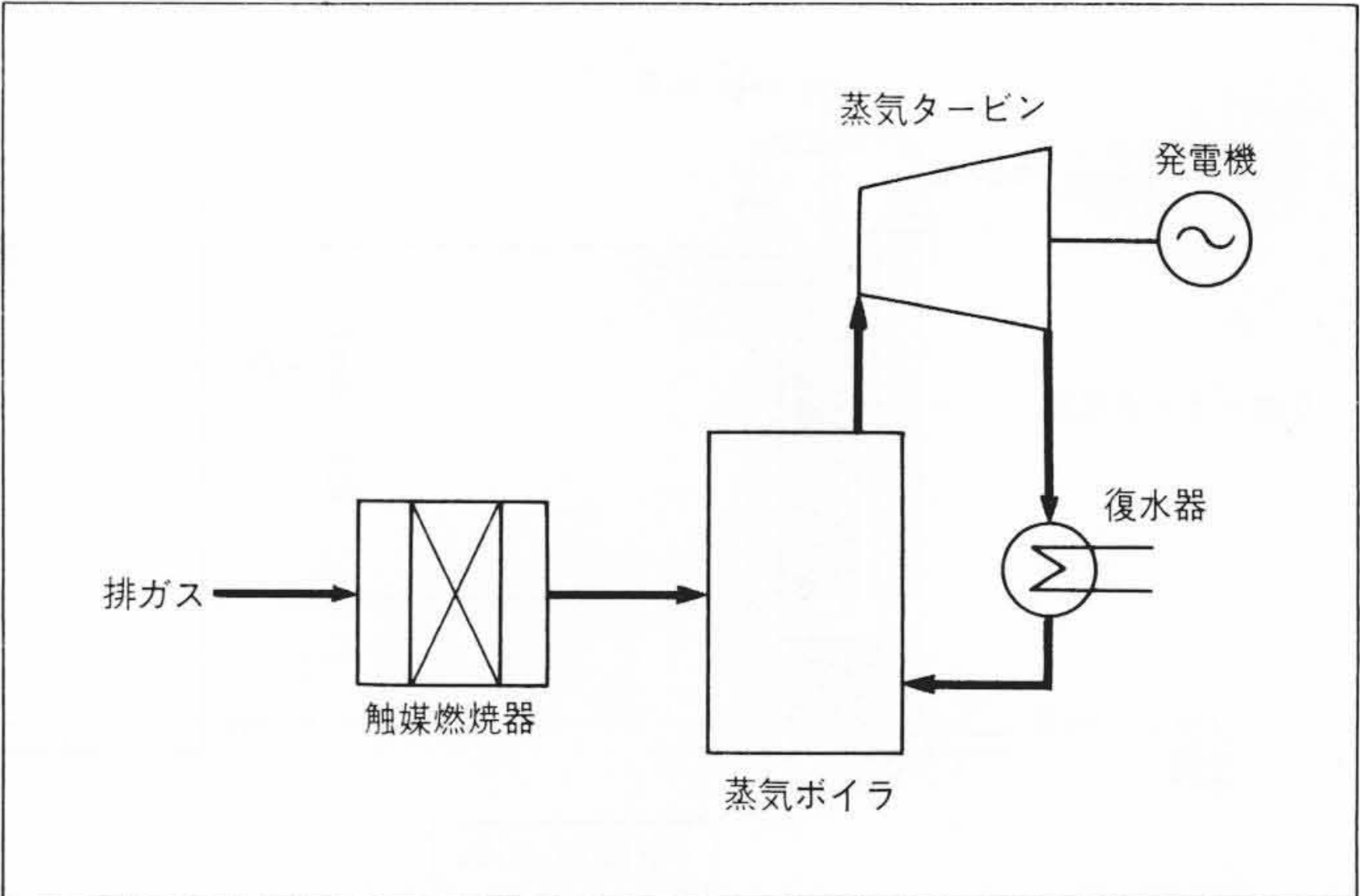


図10 化学プラント排ガスからのエネルギー回収装置 排ガス中
に含まれる燃焼成分を触媒燃焼し、エネルギーを回収する。

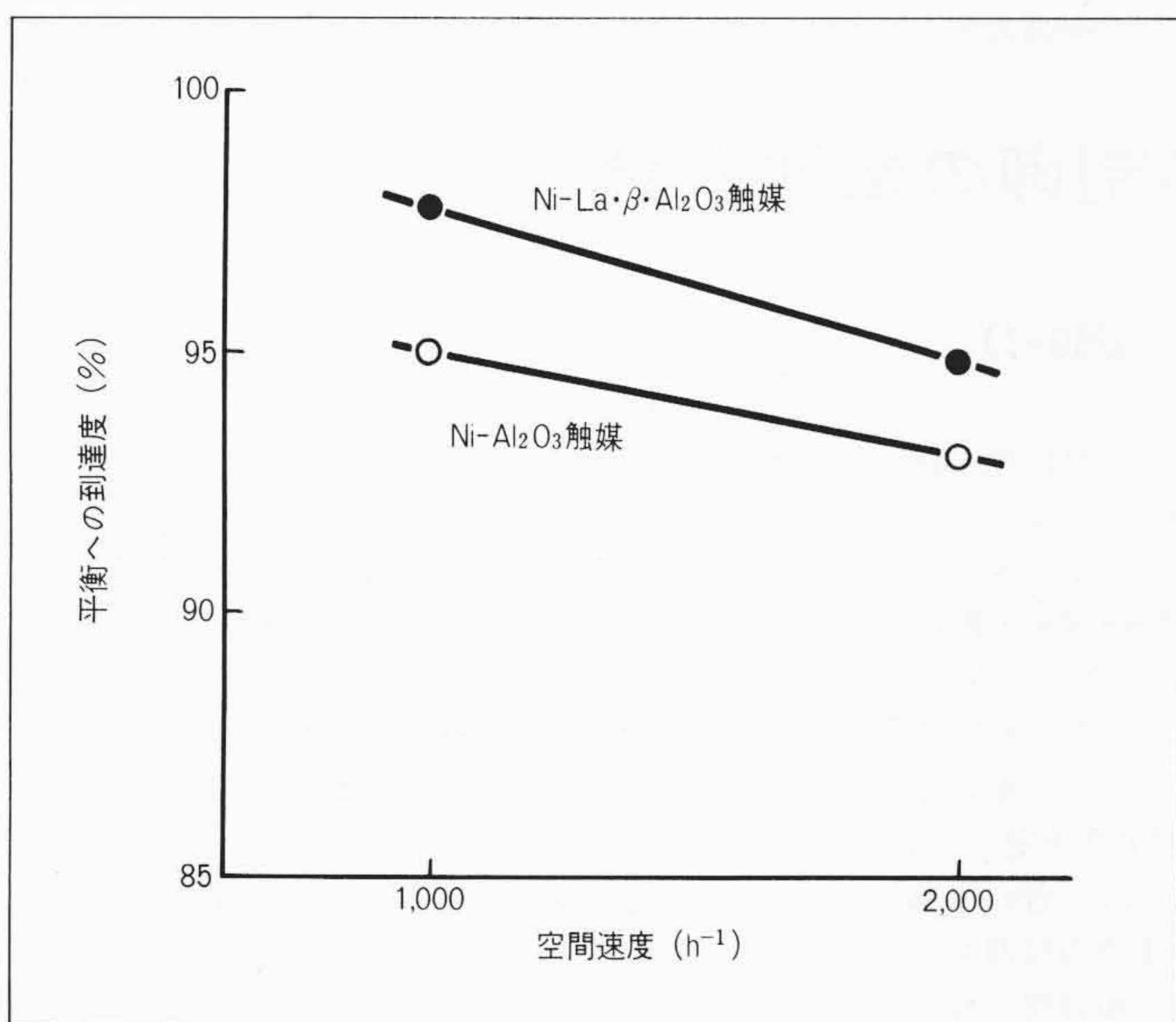


図11 開発触媒(Ni-La·β·Al₂O₃)の性能 従来のAl₂O₃に比べて、La·β·Al₂O₃担体を用いた触媒の活性は高い。

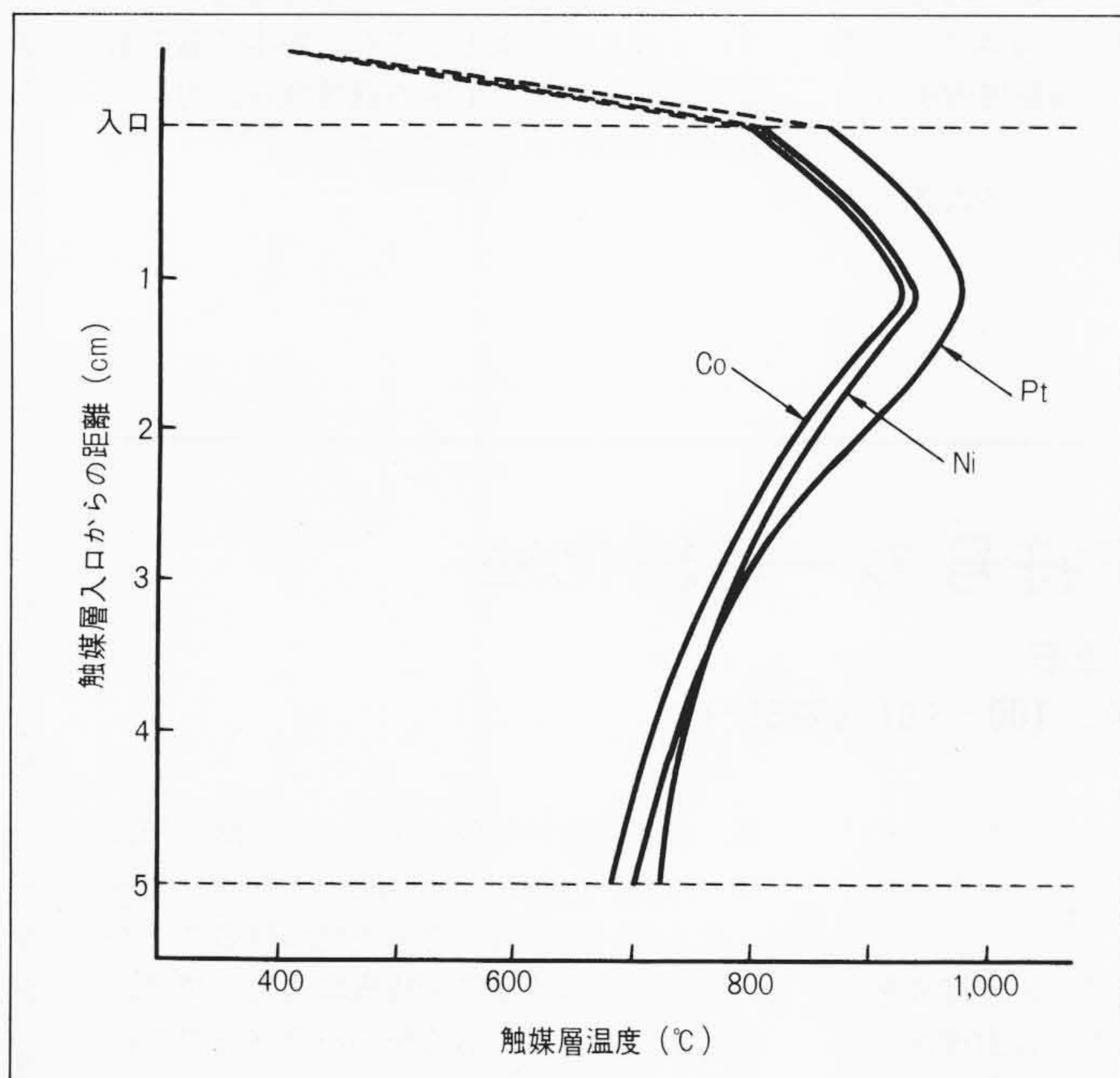


図12 プロパン部分燃焼での温度プロファイル 触媒の温度は900°C以上に達するため、耐熱性に優れたLa·β·Al₂O₃担体を用いると有効である。

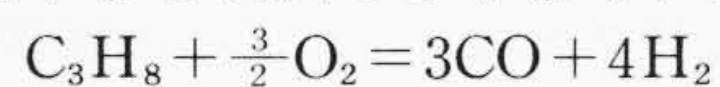
触 媒	組 成 比 (mol%)				
	20	40	60	80	100
Pt	H ₂	CO ₂ CO	C ₁ C ₂ ~C ₃	N ₂	
Ni	H ₂	CO ₂ CO	C ₁	N ₂	
Co	H ₂	CO ₂ CO	C ₁	N ₂	

図13 還元性ガスの組成 La·β·Al₂O₃担体にNi又はCoを保持した触媒を用いると、CO、H₂リッチの還元性ガスが得られる。

一つの利点は、その化学的性質を利用して触媒上での炭素析出を抑制することができることである。スチームリホーミング反応では、炭化水素の分解・重合による触媒上への炭素析出を防ぐため、水蒸気の量を炭化水素に対して3~4としている。しかし、プラントの熱効率の向上のためには、水蒸気の使用量をできるだけ少なくすることが望ましい。そのためには、炭素析出の抑制効果をもつ触媒が有効である。一般に炭素の析出は、触媒の固体酸性が強いと大きくなることが知られている。本開発の担体は、Al₂O₃の固体酸性を固体塩基を示すLaで弱めているため、炭素析出の抑制効果をもつ。したがって、スチームリホーミング反応で、La·β·Al₂O₃はα-Al₂O₃に比べ、物理的特性以外に化学的特性の点でも優れている。

4.5 還元性ガス用製造

H₂とCOから成る還元性ガスの製造法に、炭化水素を酸素で部分燃焼して得る方法がある。例えば、プロパンを完全酸化するとCO₂とH₂Oになってしまうが、酸素不足の条件下で部分燃焼すると次式で示すようにH₂とCOが生成する。



この反応は大きな発熱を伴い、触媒の温度は最高1,000°Cにも達する。このため触媒は耐熱性が要求される。そこでLa·β·Al₂O₃を担体とする触媒を用いて、プロパンの部分燃焼による還元性ガスの製造について検討した。

実験はLa·β·Al₂O₃担体に、Co、Ni、Ptを付けた触媒を断熱形反応管に充てんし、プロパン12%を含む空気(O₂/C₃H₈=1.5)を入口温度400°Cで触媒層に導入した。図12に部分燃焼時の触媒層の温度プロファイルを示す。触媒層の最高温度はいずれの触媒を用いても900°C以上に達している。図13に、このときの出口ガスの組成を示す。この結果、活性成分としてNi又はCoを用いると熱力学的平衡組成に近いH₂、COリッチの還元性ガスが得られることが分かった。

5 結 言

化学プロセスの多くは触媒を用いているが、通常200~800°Cで運転されている。最近、従来にはなかった1,000°C以上の高温で運転される化学プロセスが提案され、開発が進められている。このような高温下でも安定した性能をもつ触媒を開発するため、まず耐熱性に優れた触媒用担体の探索を行ない、1,200°Cでも37m²/gの高比表面積をもつLa·β·Al₂O₃を開発した。この担体にPdを付けたPd-La·β·Al₂O₃触媒は、1,200°Cのメタン連続燃焼で1,000時間安定燃焼できることを確認した。本開発のLa·β·Al₂O₃は高温化学プロセス、例えば触媒燃焼式リホームあるいはガスタービン、低カロリーガス排熱回収装置、水素製造プラント、還元性ガスプラントなどの触媒用担体として広範囲に使用できる。

参考文献

- 1) D.L. Trimm: Catalytic Combustion, Applied Catalysis, 7, 249~282(1983)
- 2) 石原, 外: 電力中央研究所報告, 調査報告第278035(昭54-6)
- 3) 小野, 外: リン酸型燃料電池の要素技術開発, 日立評論, 66, 2, 139~144(昭59-2)
- 4) S. Matsuda, et al.: A New Support Material for Catalytic Combustion above 1000°C, Berlin West Germany, Proceedings Vol. IV, 879~889(1984)
- 5) J. Dexpert-Ghys, et al.: Solid-State Kinetics of LaAl₁₁O₁₈, Journal of Solid State Chemistry, 19, 193~204(1976)

企業における計測制御の継続教育

日立製作所 沼倉俊郎

計測と制御 24-1, 7-12 (昭60-1)

日進月歩の科学技術の進展に対処し、企業の所有する技術の継続的革新を図るため、企業内技術教育の必要性が、国内外で日増しに高まっている。この目的に沿い昭和45年に日立技術研修所が設立された。

日立技術研修所の研修を大別すると、総合基礎技術研修と専門技術研修の二つになる。

総合基礎技術研修は、将来の指導的技術者の育成を目的とした1年半の長期コースである。この研修には、機械・エレクトロメカニクス技術を中心とするAコース、電気・電子技術を中心とするBコース、ソフトウェア(計算機科学)のCコース、情報・通信・制御技術のDコースの四つのコースがある。いずれも狭い専門的視野にとらわれず、技術者として幅広い物の見方の修得を目指している。計測制御関連の科目としては、AコースとBコースで「制御理論」を、Dコースでは「システム理論」を取り上げている。

自動制御理論の修得のためには、(1)講義、(2)演習、(3)計算機シミュレーション、(4)モデル実験(実物実験)のすべてができることが望ましい。研修所ではTSS端末を用いたデジタル計算機シミュレーション実験をさせているが、これからは実験の簡便さを考え、パーソナルコンピュータを用いたシミュレーション実験を併用する予定である。

一方、専門技術研修は、技術者の知識の拡大と刷新を図るための集中的短期コースである。平均研修期間は約10日間である。計測制御関連の講座としては、「エレクトロメカニクス設計技術」、「センサとその応用技術」、「ロボット工学」、「FA、FMSのための生産システム設計技術」などを取り上げている。いずれも基礎と応用の修得を目指しているが、「エレクトロメカニクス設計技術」では、1週間の工場体験実習を行なわせている。

企業での教育の最終目標は、各人各人が

教えられた技術を自分自身の仕事に役立てることにある。そのためには応用力の養成も大切であるが、筆者は基礎を理解するほうが、より重要と考えている。それは、

(1) 基礎を十分理解していないと、理論の間違った使い方をすることがある。

(2) 基礎を理解していないと、応用範囲が限定される。

(3) 基礎を理解していることが、高度な創造性活動の源となる。

からである。

計測制御技術は、従来から次々と新しい技術分野の企業化に貢献してきた。これからは、宇宙開発、バイオテクノロジー、ニューメディアなどの時代と言われている。いずれも制御技術の対象となる分野であろう。そのため企業としても、基本である制御理論、システム工学の継続教育に力を入れていきたいと考えている。

ランダム誤り訂正符号の一短縮化法

日立製作所 岩崎一彦・萩原吉宗

電子通信学会論文誌 J68-A, 100-101 (昭60-1)

誤り訂正符号は、記憶・通信データに冗長ビットを付加することによって、データの信頼性を高め、装置の歩留まり向上を目指す技術である。例えば、磁気ディスク表面上のきずによるデータ誤りの検出や、半導体メモリの欠陥救済などに応用されている。この技術は、従来、高信頼性を必要とする大形コンピュータに使用されることが多かった。しかし、半導体技術や各種の記憶装置技術などの発展により、大形コンピュータ以外の分野へも応用されるようになった。その一つに、アナログデータのデジタル信号処理が挙げられる。

音声・画像などのデータをデジタル化して通信・記憶する場合、下位ビットの誤りの影響は少ないが、上位ビットに生じた誤りは大きな雑音になってしまう。これがコンピュータの応用と著しく異なる点である。コンピュータの場合、データ内のどのビットも等しく重要である。一方、アナログデータのデジタル処理の場合、上位ビ

ットが相対的に重要であり、したがって、上位ビットの誤り検出率をできるだけ高くすることが望ましい。

本論文では、ランダム誤り訂正符号を短縮化するとき、短縮の仕方に自由度があることに着目し、ビット位置を考慮した、すなわち上位ビットの誤り検出率を高くするような符号の構成法を示した。

t 個までのランダム誤りを検出・訂正できる誤り訂正符号を考える。この符号は、 $(t+1)$ 重誤りが生じた場合、検出・誤訂正(ミスコレクト)・見逃しのいずれかを行なうことが知られている。本論文では、第 i ビットを含んだ $u(>t)$ 重誤りの検出・誤訂正・見逃しの確率を、線形符号とパリティ検査行列の性質から、代数学の手法を用いて定式化した。

次に、ここで求めた理論式を修正ハミング符号へ適用した。修正ハミング符号は、単一誤りを訂正し、二重誤りを検出する符号として知られている。実用上重要な(符号

長、情報点数) $= (22, 16), (39, 32), (55, 48), (72, 64)$ ビットに対し、大形コンピュータを用いて良好な符号を見つけことができた。具体的な符号構成に当たっては、理論式を用いて、ある種のパラメータを検索する必要があった。

例えば、符号長22ビットの場合、第 i ビットを含んだ三重誤り検出率 $PD_3^{(i)}$ は、 $0.316 \sim 0.691$ まで分散する。したがって、デジタル化されたデータの最上位ビットに $PD_3^{(i)}=0.691$ を割り当て、ビット位置が低くなるに従って低い $PD_3^{(i)}$ を割り当てればよい。ただし、特定ビットの $PD_3^{(i)}$ を高くすると全体としての検出率は下がる。すなわち、特定ビットの検出率と全体の検出率はトレードオフの関係にあることが分かった。

なお、計算機はHITAC M-200Hを使用し、プログラムはアセンブラとFORTRANをリンクさせて作成した。