

超音速剪断流中における燃焼現象の 気体分子運動論的解析

小幡茂男*、長島利夫†

DIRECT SIMULATION OF FUEL COMBUSTIONS
IN A SUPERSONIC SHEAR FLOW

S. Obata* and T. Nagashima†

Abstract

Direct Simulation Monte Carlo (DSMC) Method based on the Boltzmann equation has been employed to analyze fuel gas mixing and reaction in two-dimensional supersonic shear flow which is formed due to the meeting at a thin plate (lip) edge of two parallel flows, a supersonic air stream and a sonic hydrogen gas flow. The influence of hydrogen gas temperature upon the mixing within shear layer has been clarified and by applying 16 reaction system the relationship between the mixing and the endo/exothermic reaction region has been analyzed to reveal the details of ignition process.

1. 序論

スクラムジェットエンジンの燃焼器内部や排気ノズルにおける燃焼・流動形態の中でも、超音速空気流中へ気体燃料を平行に噴射する超音速剪断流は空気と燃料の混合に伴う全圧損失を抑えられるので超音速燃焼形態として有望である。本研究では、空気と燃料の初期混合状態が剪断層の成長と化学反応の進行に及ぼす影響は大きく、現象の初期過程を解明することが重要であると考え、混合と反応の極初期過程を支配する微小領域を対象にボルツマン方程式による数値解析を行った。

2. 数値計算手法

ボルツマン方程式を解くにはモンテカルロ直接 (DSMC) 法¹を用いるのが最も効率的であり、本研究はMODIFIED NULL-COLLISION法²を用いた。

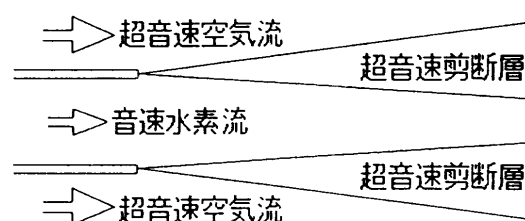
本研究で考慮した水素・酸素系の分子種は H_2 、 O_2 、 N_2 、 H 、 O 、 OH 、 H_2O 、 HO_2 の 8 種類

である。各分子には、井戸型の分子間力ポテンシャルを持つ剛体球分子モデルを与えた。燃焼模擬の素反応は表 1 の 16 反応系³を用いた。この素反応群は低温度域での反応模擬が可能であり、燃焼初期過程を精度良く解析できる利点を持つ。

反応による巨大な化学エネルギーの増減を含めたエネルギー等分配を模擬するための内部自由度間エネルギー分配モデルとしてBorgnakke-Larsenの内部自由度モデル⁴を採用し、エネルギー等分配の達成と任意比熱比の表現を可能としている。

3. 計算条件

下図に本研究で対象とした超音速剪断流の流れモデルを示す。上下を流れる超音速空気と厚み無しの仕切り (リップ) で分けられた音速気体水素



* 東京大学大学院
+ 東京大学工学部航空宇宙工学科
Graduate school, Univ. of Tokyo
† Department of Aeronautics and Astronautics, Univ. of Tokyo

は空気流と平行に噴射され、リップ端から混合・燃焼を開始する。計算は図の上半分に対して行い計算領域の下面は対象境界とした。上面は一様に超音速流入空気と同条件に保ち、リップ表面は滑り境界である。流入境界には空気・水素の一様流入条件をそれぞれ与え、流出境界は0次外挿の超音速流出とした。計算は下表に示す3通りの条件

空気静圧=1.00[atm] 水素静圧=1.00[atm]
 空気マッハ数=2.44 水素マッハ数=1.00

	空気静温	水素静温	運動量比	密度比	速度比
A	1500 [K]	250 [K]	5.95	2.40	1.56
B	1500 [K]	500 [K]	5.95	4.80	1.11
C	1500 [K]	1500 [K]	5.95	14.4	0.64

クヌーセン数=0.02 レイノルズ数=122

を与えて行った。計算領域は一辺が流入空気の平均自由行程長の立方体セルにより横方向200個、縦方向60個に分割されている。水素噴射口の高さを代表長さとするクヌーセン数は0.02、レイノルズ数は122である。

4. 結果と考察

計算結果は図1から図8までで、皆、上からケースA、B、Cである。燃焼が流れ場に与える影響を見るため、反応手続き無し(図1~図4と図7)と有りの計算を行ったが、両者に差はほとんど無かった。計算領域がリップ周りの極小さな領域で燃焼が完結するには短すぎるため、反応に伴う熱が流れに不安定状態を引き起こしていない。

図1は等渦度線図である。ケースA、Bとケー

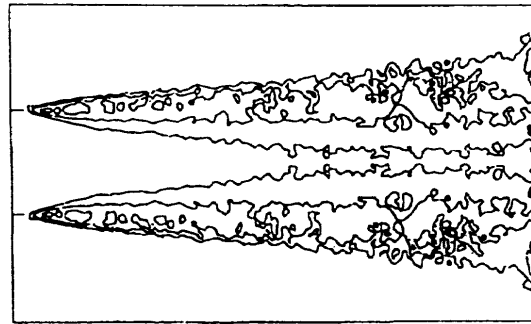
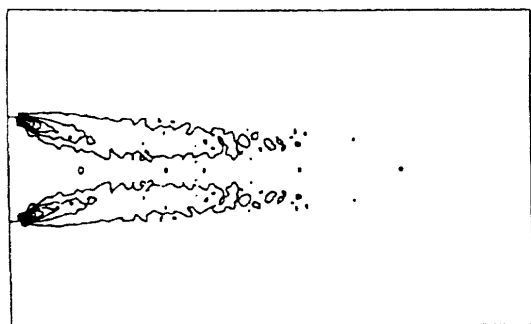
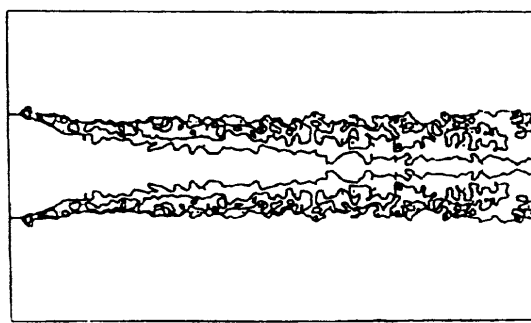
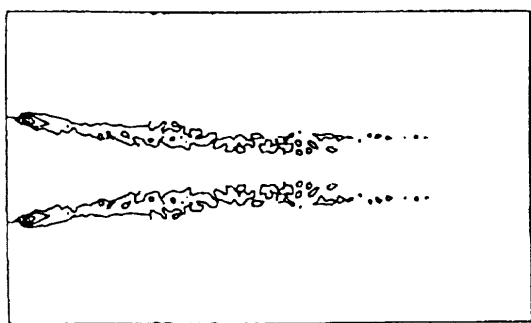
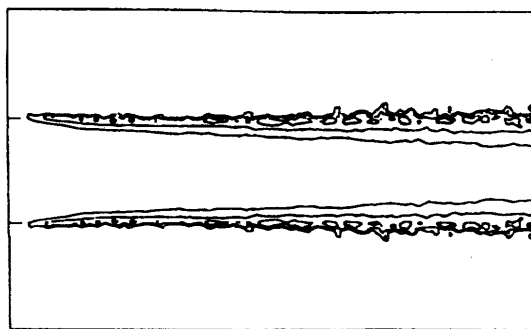
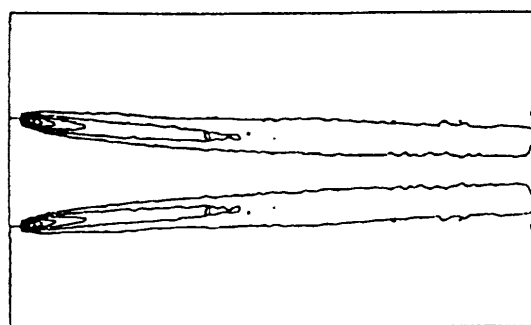


図1 : 等渦度線図

図2 : 等粘性係数線図

スCは渦の向きが異なるが、3ケースの渦の発生と拡散の仕方がひどく違う。速度剪断が小さいためBの渦は他の2ケースと比べて弱い。Aの渦が下流部にまでゆっくりと拡散してゆくのに対し、Cではリップ背後で形成された強い渦が速やかに拡散して速度剪断を解消している。

剪断層の成長の仕方を、流入速度方向の剪断力とそれと垂直方向の流れ速度勾配との比で粘性係数を定義した結果を図2に示す。Aでは図1と同じく、剪断層がゆっくりと成長している。Cでもリップ背後から急激な剪断層の成長が見られ、その広がりや強さが際立っており、図1の結果と共通している。一方、Bは大きな渦は作らないが、分子拡散により確実に空気と水素の運動量の交換が行われており、空気と水素の相互の拡散力のみ

による剪断層の成長がAよりも速くなっている。前回の報告⁵と同じく、ケースAの渦の向きでは剪断渦が混合を抑制する方向に働いている。

図3に線間隔10%の水素体積濃度等高線図を示す。全てのケースでリップ背後の水素が空気側へと入り込んでいる。A、Bでは下流部まで水素90%以上の領域が存在するが、Cでは出口に達する前に噴流中心まで空気が入り込み流れ場全域で大きな混合が達成されている。

図4は図2同様に、流入速度方向とは垂直な方向の水素の移動流束と濃度勾配の比で定義される水素拡散係数を図にしたものである。Cはリップ直後で強い拡散を起こし、計算領域半分まで幅の広い帯を持っている。また、水素噴流中心寄りに拡散がひと際強い部分が有る。AとBの結果は良

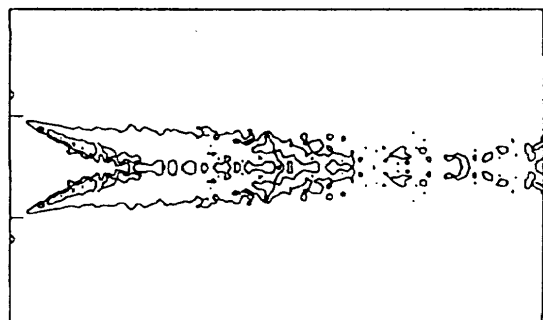
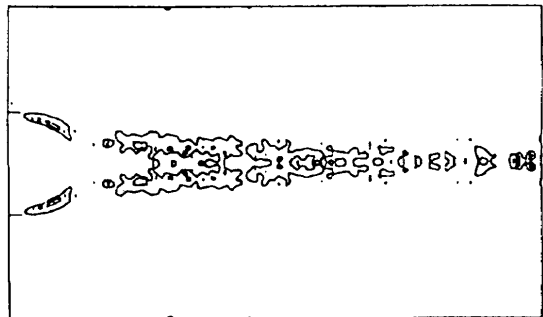
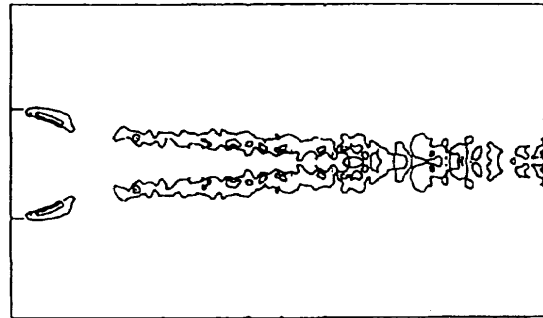
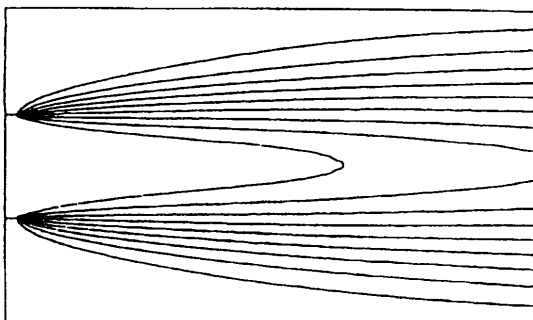
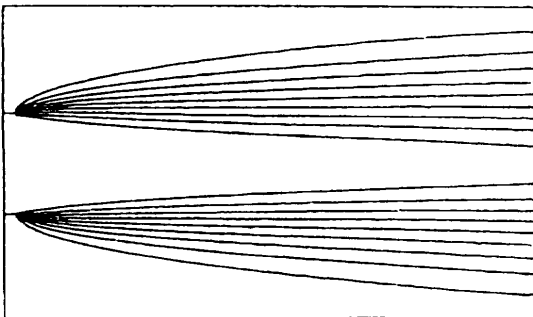
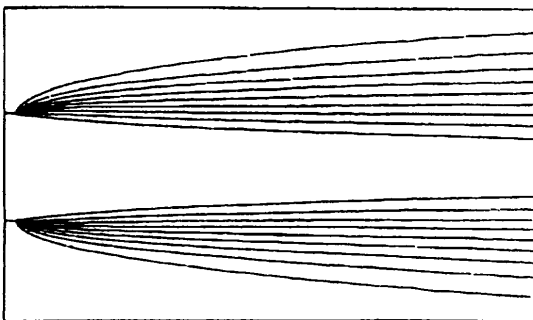


図3：等水素体積濃度線図

図4：等水素拡散係数線図

く似ているが、Bでは拡散帯が下流へ行くに連れ徐々に狭くなるのに対して、Aでは下流部でも依然拡散帯が認められている。BはAよりも剪断層の成長が速く、噴流中心部に空気が入り込み、水素の拡散力を弱めるのに対し、Aでは渦の向きが混合を抑制するので水素濃度は高いまま保たれ拡散力が衰えないと考えられる。

以上の図1～図4、反応手続き無しの流れ解析の結果を重ねてみると、流れの粘性の強い部分と水素の拡散が大きな領域がどのケースでも一致していない。常に水素拡散帯が水素噴流中心側の水素濃度90%以上の領域に有るのに対し、粘性帯は水素濃度90%～80%・空気濃度20%以下の領域に位置している。剪断層内の空気と水素の混合は水素がその大きな拡散力で空気側へと進入してゆく

ことで始まるため、水素拡散係数は水素濃度90%以上の部分で強く現れるのである。次に、一旦空気と混った水素がその軽質量のためすぐに空気流側の速度へ慣らされるので、運動量交換による粘性力は空気濃度20%付近で大きくなるのである。本研究の計算条件では、総じて物資の輸送が水素側から空気側へと進むことが分った。

次に燃焼計算結果を示す。図5と図6はそれぞれ等吸熱線図、等発熱線図であり、水素温度の差が大きく反映されている。吸熱反応の中でも上流部で起きるほとんどは表1の反応番号⑤による水酸基ラジカル生成反応である。どのケースでも反応はまず空気流側の水素濃度の低い領域で始まっている。ケース毎にこの吸熱反応開始位置は上流または下流へずれるが、吸熱帯は皆図3の水素濃

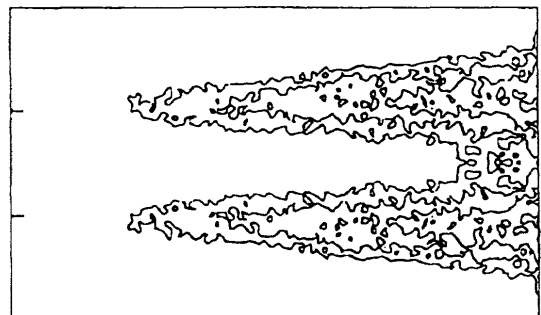
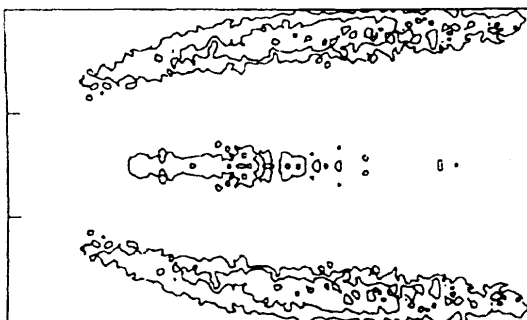
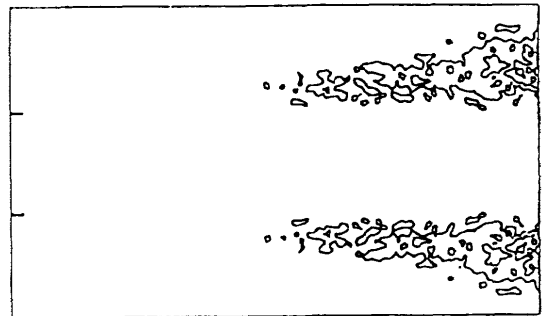
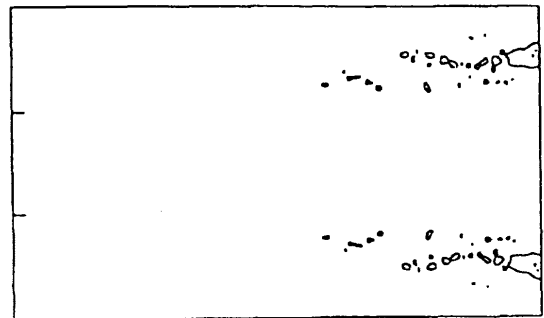
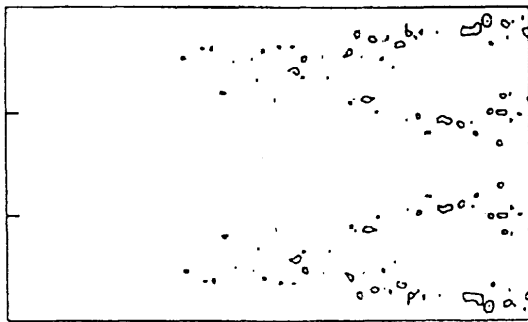


図5：等吸熱線図

図6：等発熱線図

度10%前後に位置している。吸熱帯で生成された各種ラジカルはその下流部にて、主に表1の反応番号③、④を経由してより安定な水蒸気へと再結合する。その時発生する巨大な化学エネルギーが図6の発熱帯を形成する。図5と図6から吸熱帯のすぐ下流に発熱帯が位置していることが分る。本計算領域の小ささを考慮に入れば、反応の開始点から発熱点までの吸熱領域を物質が通過するのにほとんど時間がかからないことが分る。何らかの方法で初期混合領域、とりわけ水素濃度10%の領域に強制的な着火を行えば、容易に高効率の超音速燃焼を達成できることが予想される。

上記の他にも、図5の水素噴流の中心部、ほぼ水素濃度100%の領域にわずかながら吸熱領域が存在する。特にCにはっきりと現れているが、Bにも存在している。この反応は反応回数としては少ないが、大きな吸熱が起きていることと、この

領域に他のラジカルと比べて極めて多くの単原子水素ラジカルが存在することが分った。その結果ここでは表1の反応番号⑩の水素乖離反応が直接起きていた。⑩番の反応は巨大な活性化エネルギーを持つため常温ではめったに起こらない反応であるが、この領域は図6の発熱領域のさらに下流に位置しているため水蒸気再結合で余った発熱エネルギーが供給され乖離反応を開始している。

以上のように初期燃焼過程が、短い吸熱過程とそれに続く発熱過程さらに水素乖離の単原子水素ラジカル生成過程によって構成されていることが明らかになった。また、噴射水素温度が燃焼過程を劇的に変化させることもはっきりした。

最後に混合と燃焼のそれぞれの過程を流入速度方向と垂直な断面で下式の様な混合効率と燃焼効率を定義した結果を図7と図8に示す。どちらも横軸は流れ方向距離で、左が入口、右は出口であ

$$\text{混合効率} = \frac{\int \frac{\text{可燃水素流量}}{\text{当量比}} dA}{\frac{\text{断面全体の可燃水素流量}}{\text{断面全体の当量比}}}$$

$$\text{燃焼効率} = \frac{\int \frac{\text{燃焼水素流量}}{\text{当量比}} dA}{\frac{\text{断面全体の可燃水素流量}}{\text{断面全体の当量比}}}$$

当量比が1より小さい場合は1に修正し積分

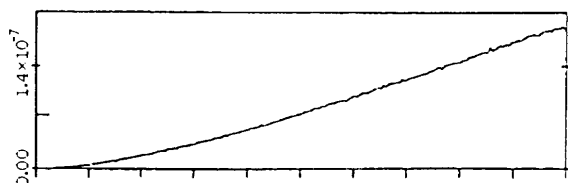
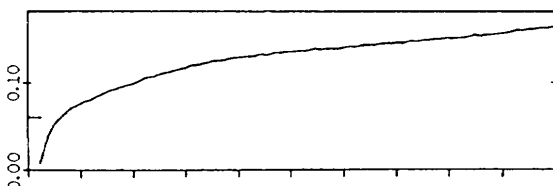
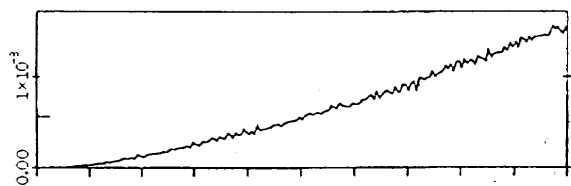
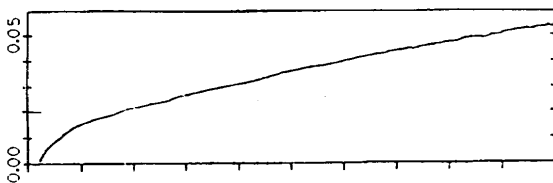
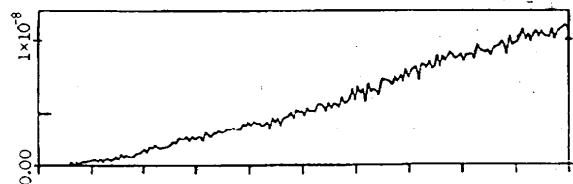
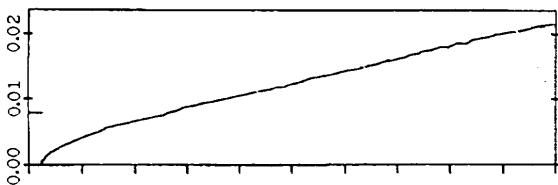


図7：混合効率図

図8：燃焼効率図

る。図7ではCの混合効率が最も大きく、Aが最も小さい。しかし、リップの直後で混合効率の線が大きく立ち上がりその後はやや緩やかになりながら一定の傾きで効率を出口に向かい上がってゆく傾向は3ケースに共通して見られている。3ケースで相似な流れ場を作っていたことは図1～図4では判然としなかった点であり、渦の向きによらない共通の結果である。リップを出てすぐの初期混合過程は空気と水素の拡散力だけに支配されていることが分った。図8の燃焼過程は流れ方向に一定の速度で進んでおり、水素の温度の高低のみが傾きの大小となって現れている。また、図7と比較して、リップ直後の混合効率が大きく上昇している部分でも燃焼効率は全く変化せずに一定の傾きを保っている。これらから混合過程と燃焼過程がおのおのの独立に進行する過程であり、混合が達成されてもそれと共に十分なエネルギーの輸送を伴わないと燃焼は進まないことが分る。

5. 結論

ボルツマン方程式に基づくDSMC法による超音速剪断流燃焼解析によって以下の知見を得た。

①混合過程は主に水素の持つ拡散力により起きているので、噴射水素の温度を上昇させることにより着火性能の向上のみならず混合効率を改善することが出来る。

②燃焼過程は初期ラジカル生成の吸熱反応、水蒸気再結合の発熱反応、単原子水素生成の水素乖離反応の3つから構成されている。

③混合過程と燃焼過程は熱エネルギーを介さないときは互いに独立に進行する。

Reference

1. G. A. Bird "Molecular Gas Dynamics"
Oxford Univ. Press, London, 1976
2. K. Koura
"Null-collision technique in direct-simulation Monte Carlo method"
Phys. Fluids 29 November 1986 pp3509-3511
3. J. S. Evans and C. J. Schexnayder Jr
"Influence of Chemical Kinetics and Unmixedness on Burning in Supersonic Hydrogen Flames"
AIAA Journal Vol. 18 No. 2 188-193, 1980
4. C. Borgnakke and P. S. Lasen "Statistical Collision Model for Monte Carlo Simulation of Polyatomic Gas Mixture"
J. Comp. Phys. 18 405-420, 1975
5. 小幡茂男、寺本進、長島利夫
"2次元超音速剪断流に関する直接シミュレーション"
第33回航空原動機・宇宙推進講演会 1993

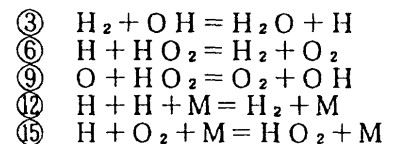
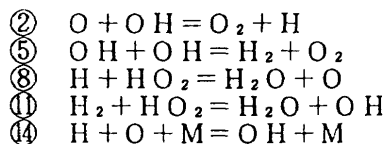
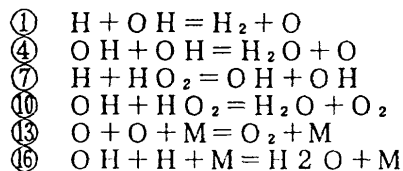


表1 : 16素反応系