

# スラッシュ水素の製造とその取扱い

岩谷産業株式会社  
技術・保安本部技術部  
宮崎 淳

## はじめに

液体水素は、単位重量当たりの推力（比推力）が他の燃料と比して高く、わが国のH-IIをはじめとして米国のスペースシャトル、フランスのアリアンと世界の主だったロケットエンジンの燃料として使用されている。

この様に液体水素は優れた燃料であるが、密度が他の燃料に比して格段に小さく、タンクの大型化や構造重量、空力抵抗の増大がもたらされる。この欠点を補うものとしてスラッシュ水素が注目されている。

スラッシュ水素は、液体水素をさらに冷却することによって得られる固・液共存のスラリー状流体であり、その様相がシャーベット状の融けかかった雪に似ていることから「Slush」水素と名付けられた。スラッシュ水素は、液体水素に比べ高密度、高冷熱容量を有するため、ロケット燃料のみならず将来のスペースプレーン燃料、さらにはエネルギーの輸送・貯蔵媒体としても期待されている。

本稿では、スラッシュ水素の製造方法を中心に研究開発の現状、課題を述べるとともに航空宇宙技術研究所と共同で実施している製造実験の概要についても紹介したい。

## 1. スラッシュ水素の特徴

スラッシュ水素の物性は、表1に示すとおりであるが、密度は液体水素に比べ約15%大きく、冷熱エネルギーが約83kJ/kg増加する。

表1 スラッシュ水素の物性<sup>(1)</sup>

物 性	固体水素 (三重点)	スラッシュ水素 (50%固体)	液体水素 (三重点)	液体水素 (沸点)
温 度 (K)	13.8	13.8	13.8	20.3
圧 力 (kPa)	7.03	7.03	7.03	101.4
密 度 (kg/m <sup>3</sup> )	86.67	81.54	77.06	70.81
エンタルピ (kJ/kg)	10.58	39.68	68.80	122.4

スラッシュ水素をロケット、スペースプレーンの燃料に用いた場合、密度が大きいため燃料タンクの小型化が図れ、機体重量の軽減につながる。また、スペースプレーンでは機体先端部分等の温度が2000℃以上に達するため、その冷却が必要となるが、スラッシュ水素は冷熱エネルギーが大きく、それを機体表面の冷却に利用できる。このような理由でスラッシュ水素がスペースプレーン燃料として注目されている。また、高密度・高冷熱エネルギーといった特性をWE-NET計画でのエネルギー輸送・貯蔵媒体として利用することも考えられている。

## 2. スラッシュ水素の製造方法

スラッシュ水素の製造方法はいくつか検討されているが、代表的なものについて紹介する。

### 2-1. 凍結-融解 (Freeze-Thaw) 法

図1に本プロセスの概念を示す。液体水素を充填した容器内を三重点まで真空引きし、その際発生する蒸発潜熱 (106.5~108.3kcal/kg) により液温を下げていき、液表面に固体水素を生成する (凍結プロセス)。この状態で、真空引きを停止し圧力を三重点より僅かに上昇させると、外部からの熱侵入により容器壁面部分の固体が融解、容器への付着力が失われて沈降し (融解プロセス)、三重点液体水素と混合してスラッシュ水素が形成される。これまでの研究によるとこのプロセスの最適サイクルは5~10秒程度とされている。沈降した固体水素を砕く目的と容器内温度を均一にするために攪拌する方が効率の良い製造が可能と考えられる。

この製造方法は、装置・構造が比較的簡単で、少量の生産においては安価にスラッシュ水素を製造することができる。しかし、容器内は常に三重点付近の負圧となるため空気を吸い込む恐れがあるという安全性の問題、及びバッチプロセスで連続製造できないという欠点がある。

### 2-2. 液体ヘリウム熱交換法 (オーガー (Auger) 法)

図2に示すような装置の内側に液体水素、ジャケット部に液体ヘリウムを流し、液体ヘリウムの冷熱と熱交換することにより内側に固体水素を氷結させる。その固体水素を中央の刃のついたドリル状のもの (オーガー) を回転することにより削り落とし、液体水素と混合してスラッシュ水素を製造する。

本プロセスでは、オーガーの駆動部、熱交換器等があり装置が複雑となる。また、高価な液体ヘリウムを大量に使用することから製造コストが高くなるという欠点がある。しかし、システムの工夫により連続運転が可能であり大量製造に向くとされている。

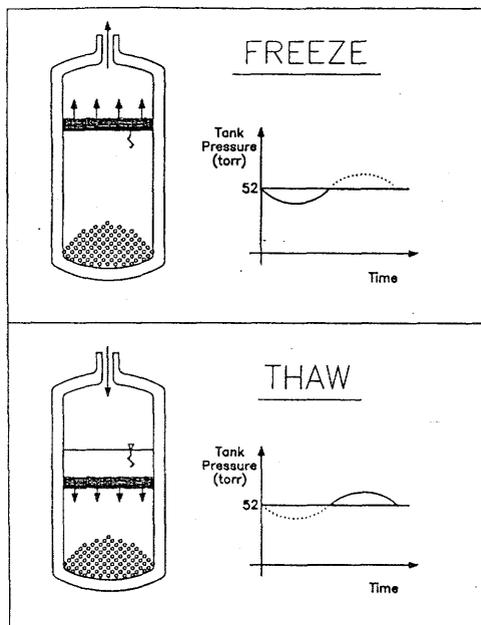


図1 凍結-融解法

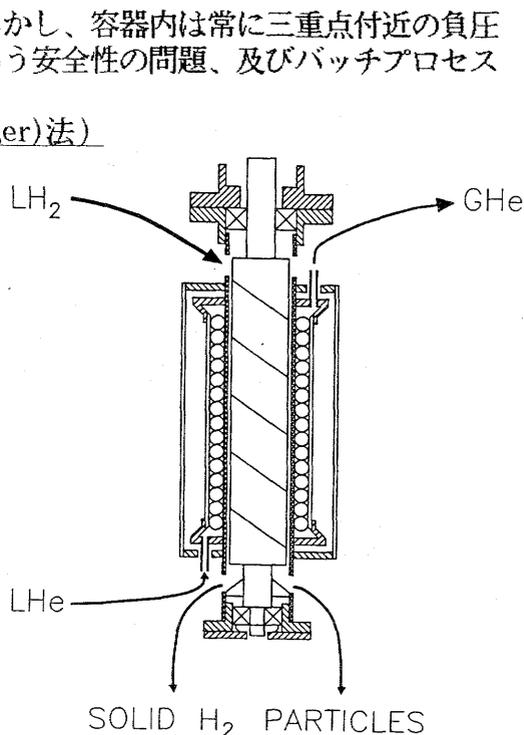


図2. オーガー法

### 2-3. その他の製造方法

その他の製造方法としては、三重点液体水素中に極低温ヘリウムガスを直接吹き込む方法がある。この場合ヘリウムガスの流路に沿って固体水素の管が形成され、その管を砕くことによってスラッシュ水素を製造する。

また、スプレー法と呼ばれる方法では、三重点液体水素を減圧室に噴射することによって、できるだけ球形に近い形の均質な固体水素を得ることができる。しかし、製造時間が長く、設備が大型化し、大量生産に向かないとされている。

その他、磁性体に強い外磁場を加えたり除いたりする磁場印加サイクルにより磁性体が吸熱する磁気熱量効果を利用した磁気冷凍法がある。特に最近磁性体の改良により20K付近で「高温磁気冷凍法」の実用化が進められている。

これらの方法によって得られた製造直後のスラッシュ水素は、Fresh Slushと呼ばれているが、非常に細かで鋭い形状を有する固相が絡み合って存在している。しかしながら製造後5～6時間経過すると固相の凝集が進み、さらにその形状は滑らかで丸みを帯びたものとなって大型化し密度も増加する。この状態をAged Slushと呼ぶが、Fresh Slushより流動特性に優れているとの報告がある。<sup>(2)</sup>

### 3. 研究開発の現状

ロケット燃料としてのスラッシュ水素の優位性については早くから着目されており、すでに1960年代に米国NBS（現NIST）を中心に多くの研究が成されていた。その後中断されていたが、1982年からスタートしたNASP（National Airo-Space Plane）の候補燃料の1つとして、NASA Lewis Research Centerが中心となって検討が進められている。

NASAでは、大型のスラッシュ水素製造装置をデンバーにある Martin Marietta Corporation内とオハイオ州のNASA Lewis Research Center内の2箇所に所有している。製造プロセスは、凍結-融解法、製造能力は、1回当たり500lb（約2,800L）である。

なお、NASAではこれらの装置による試験データを基にして、将来的には15ton/日のスラッシュ水素製造設備の検討を行う予定である。<sup>(3)</sup>

### 4. スラッシュ水素製造試験<sup>(4)</sup>

我々も1991年より航空宇宙技術研究所と共同でオーガー法によるスラッシュ水素製造実験に取り組んでいるのでその概要を紹介する。

#### 4-1. 試験装置及び試験方法

オーガー法スラッシュ水素製造試験装置の概略フローを図3に示す。スラッシュ水素製造容器は、内容積60Lの液体窒素シールド式真空断熱容器を用い、この容器内に液体ヘリウム熱交換器、オーガーを組み込んでいる。液体ヘリウムは、250L貯蔵容器よりトランスファーチューブで熱交換器に導入する。固体水素をかきおとすオーガーの駆動部はマグネットドライブ方式を採用し、回転部分からのリークが起らない構造としている。更に容器底部には容器内を攪拌するためのプロペラを設置している。尚、本製造装置では、液体水素を三重点温度まで冷却するための真空引きシステムも設けている。

製造試験中の計測データは表2に示すとおりであるが、これらのデータはリアルタイムでCRT画面上に表示され、運転時のコントロールの参考データとしても活用されている。また、容器側面にはガラス製の覗き窓を設け、スラッシュ水素の挙動をビデオにより常時観察している。

本試験装置は、オーガー法試験装置ではあるが、三重点までは真空引きにより内槽温度を下げ、三重点付近で液体ヘリウムを流し始め、容器内が三重点圧力に

達したところで真空引きを停止し、その後は液体ヘリウムの冷熱のみでスラッシュ水素を製造する。

表2 スラッシュ水素製造試験計測データ

- ・内槽圧力
- ・内槽温度3点：オーガー上部(+50mm)、中心部(±0)、下部(-50)
- ・ヘリウム熱交換器出口温度
- ・ヘリウム流量（流量計温度、圧力含む）

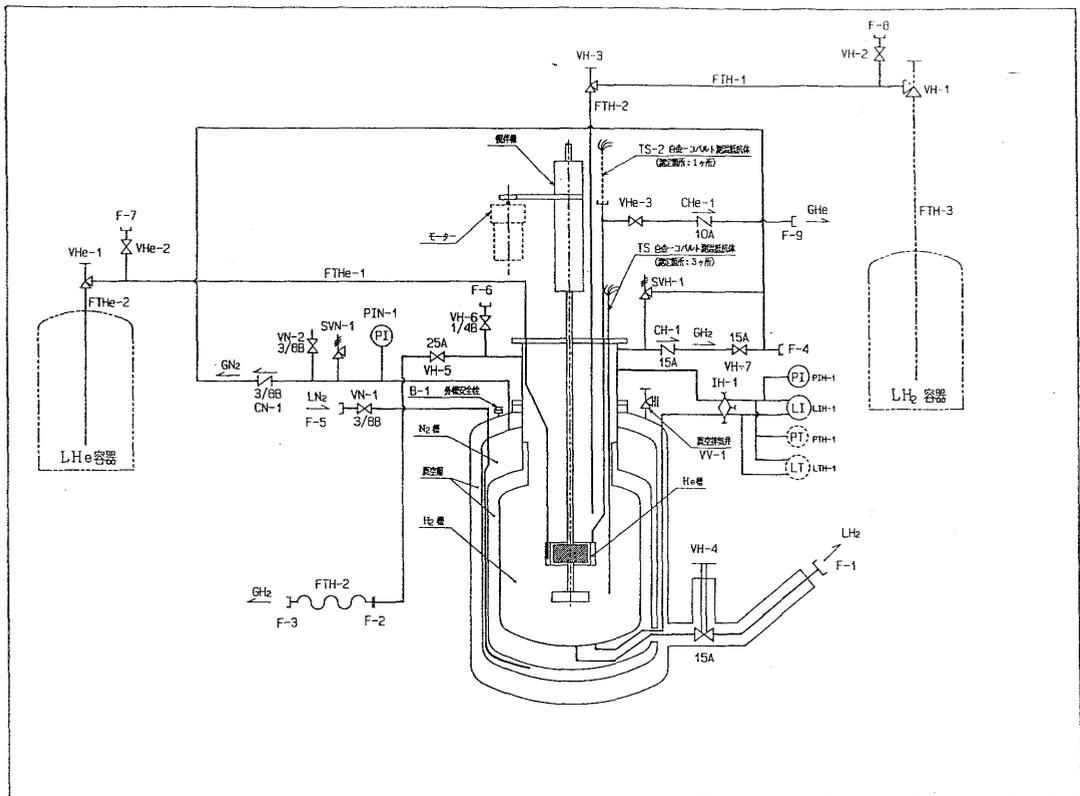


図3 スラッシュ水素製造試験装置概略フロー

#### 4-2. 試験結果

スラッシュ水素製造試験の1例を紹介する。スラッシュ水素製造中の内槽温度を図4に示す。内槽圧力が8kPaを下回った段階で液体ヘリウムの導入を開始しているが、当初ヘリウムラインの温度が高いため一端温度、圧力とも若干上昇する。この時の製造時間は、47分間でスラッシュ水素製造に用いたヘリウム流量は、1.3~2.1NL/sec、平均1.5NL/secである。

スラッシュ水素保持状態の内槽温度を図5に示す。製造終了後63分あたりから

内槽圧力、温度とも上昇し始め固体水素が消失したことを示している。これは覗き窓から目視により確認した状況と一致している。

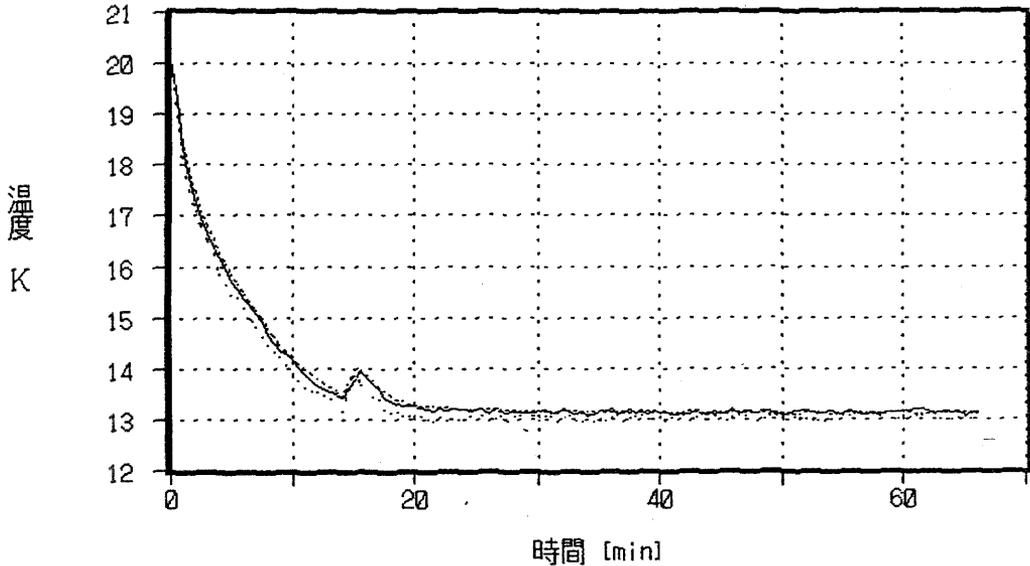


図4 スラッシュ水素製造時の温度変化

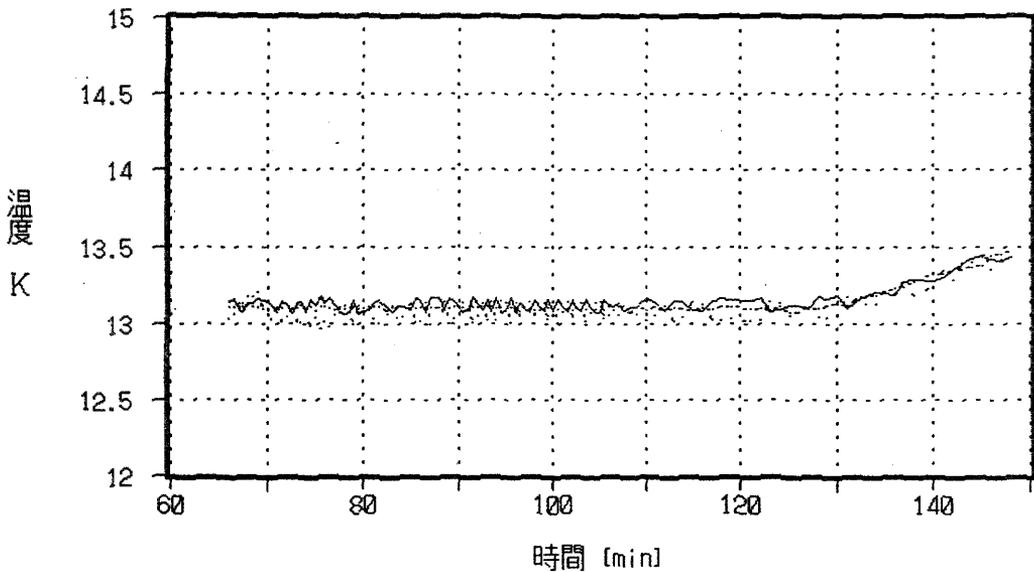


図5 スラッシュ水素保持状態の温度変化

スラッシュ水素製造量を容器への熱侵入量から求めると約10Lとなり、熱交換率は、約71%となる。これらの試験により以下の結論を得た。

- ①オーガー法で製造したスラッシュ水素はフリーズ・ソー法で製造したものより、粒子が細かく雲状で、より流動性を有しているように目視では確認できる。
- ②製造時間が長くなると熱交換器表面固体水素成長により熱伝導度が低下し、製造効率が落ちる傾向がある。

③槽内の温度分布が大きく、現状では容器内攪拌が不十分である。同様に固体相が大量に底部に沈むと、固体粒子を十分に攪拌できなくなる。従って攪拌効率をかなり上げる必要がある。

#### 5. 今後の研究開発課題

ここまで、スラッシュ水素製造に関して述べてきたが、実用化に向けてはその他、以下に示すような研究開発課題がある。

##### 5-1. スラッシュ水素計測技術<sup>(5)</sup>

スラッシュ水素は、固・液共存状態であるため、密度計測ができないと製造量、移送量、充填量等の確認ができず利用する際に支障をきたす。従って、密度計の開発は非常に重要である。

いくつかの密度計測方法が考えられているが、キャパシタンスセンサーを用いたものが有力視されている。この方法は、密度の変化によりコンデンサ内の誘電率が変化することを利用したものであり、他の方法に比べ精度が高く軽量で小型の装置が可能である。

##### 5-2. スラッシュ水素貯蔵技術

スラッシュ水素を貯蔵する場合には、固体水素の融解を防ぐため容器の断熱性能を向上させる必要がある。あるいは、冷却装置を設置する等の検討も必要となる場合もあろう。また、固・液分離を防止するために攪拌装置の設置等も検討する必要があると考える。

##### 5-3. スラッシュ水素移送技術

スラッシュ水素を移送する方法としては、低温ガスによる加圧法、ポンプによる移送が考えられるが、そのためには、圧力損失等移送時の流動特性の把握が必要となる。更に、流動特性と固体含有率の関係を掴み、その特性をより生かせる固体含有率の大きな高密度スラッシュ水素の開発が重要である。

#### おわりに

以上スラッシュ水素の製造方法を中心に開発すべき幾つかの課題について述べたが、本格的な研究開発に取り組んで日が浅く、しかも小規模な実験段階であり、実用化に向けての研究開発が進めば更に、多くの問題が出てくるものと予想される。

しかし、スラッシュ水素は、昨年度よりスタートしたWE-NET計画の根幹をなす水素エネルギーの延長線上にあり、将来のクリーンエネルギー、高密度エネルギーとしての期待は大きい。

#### 参考文献

1. 熊川彰長：スラッシュ水素、燃料協会誌、Vol.68, No.2, P107-118, (1989)
2. D. B. Mann, P. R. Ludtke, C. F. Sindt and D. B. Cheltor : Advanced in Cryogenic Engineering, Vol.11, P207, (1966)
3. R. B. Moore, G. E. Kinard and D. Nahmias : Slush Hydrogen Production for The National Aero-Space Plane Programs, 8th WHEC Proceedings, P107-121, (1990)
4. 田村洋、宮崎淳、矢田部勝、八柳信之：スラッシュ水素製造試験、第37回宇宙科学技術連合講演会講演集、P433-434, (1993)
5. 日本航空宇宙工業会：革新航空機技術開発に関する調査研究成果報告書「将来輸送機推進システムへのスラッシュ燃料適用に関する研究」、P5-7, (1994)