

アルミ-水反応の衛星推進系への適用

著者	東野 和幸, 杉岡 正敏, 小野寺 英之, 増田 井出男
雑誌名	室蘭工業大学航空宇宙機システム研究センター年次報告書
巻	2013
ページ	58-62
発行年	2014-08
URL	http://hdl.handle.net/10258/00008835

アルミー水反応の衛星推進系への適用

東野 和幸 (航空宇宙機システム研究センター 教授)

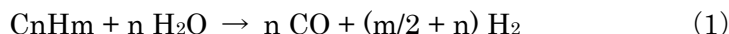
杉岡 正敏 (航空宇宙機システム研究センター 特任教授)

○小野寺 英之 (機械航空創造系学科 4年)

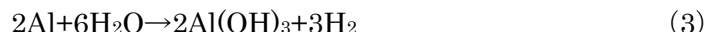
増田 井出男 (JAXA 研究開発本部)

1. はじめに

現在、宇宙機推進システムの燃料としてヒドラジンが使用されている。ヒドラジンは高比推力で貯蔵性に優れた燃料である。しかし、ヒドラジンは人体に極めて有毒である。そこで本学ではAlと水の反応から得られる水素を宇宙機推進システムに適用する研究を行っている。水素は化学推進薬の中でも最も比推力が高く、人体に無害である。しかし、従来の水素製造法である(1)、(2)式の水蒸気改質法では、化石燃料が必要であり、地球温暖化の原因であるCO₂を副生する。



また、水素は金属中に吸収され金属タンクの結晶格子内で金属水素化物になり、金属材料の強度を低下させる(水素脆性)。さらに水素分子は非常に小さく、水素漏れにより貯蔵性が低い。これらのため、長期ミッションが目的である人工衛星への適応性は低い。しかし、(3)式に示すAlと水による水素製造方法では以下の利点が存在する。



(3)式で得られる生成物は水素と水酸化アルミニウムのみで、どちらも人体に無害であり、環境への負担も小さい。また人工衛星での噴射に必要な水素のみを随時製造することができるため、長期間水素を貯蔵する必要がない。

これまで本学ではAl合金であるAl-40%Sn-10%Biを用いることで短時間で高圧水素を製造することに成功している¹⁾。しかし、重量検討の結果、ヒドラジン系推進システムと比較して1.2倍重量が増加することが判明した。さらに反応温度を90[°C]に設定する必要があるため、電力を多く必要とする。また、宇宙機のエンジンは何度も始動する必要があるが、Al/水反応を停止した後、再度水素製造が可能か確認していない。

そこで、本研究では、軽量で反応温度が低く、反応の制御が可能であるAlとAl合金粉末の開発、反応条件の解明、およびアルミー水系の比推力の測定を目的とした実験を行った。また、アルミー水系と他の推進薬との比較を行った。

2. 実験概要

2-1. 実験装置

本研究での水素製造は金属製高圧反応容器(オートクレーブ)を用いた。ヒータで実験温度まで加熱し、水素製造量を水上置換で測定した。Al合金の作製にはセラミック製管状電気炉を用いた。金属試料をアルミナ製タンマン管に入れ、



(a)オートクレーブ (b)捕集管

図1 実験装置

電気炉を使用して溶解させて Al 合金を作製した。

2-2. 実験方法

表 1 に①加熱実験, ②粒径変化実験, ③Al-Sn 合金と Al-Zn 合金の水素製造実験の条件を示す。①加熱実験では水と純 Al を実験温度まで上昇させ, 水素を発生させる。30 分間水素を発生させた後ヒータを止め, 30[°C]まで自然冷却させる。温度が 30[°C]まで低下後, 再び実験温度まで上昇させる。これを 4 回繰り返す。90[°C]の場合では, 無攪拌の実験も行う。②粒径変化実験では, 水と純 Al を実験温度まで上昇させる。実験温度まで上昇した後に, 温度を一定に保ち, 実験時間に達するまで水素製造量を計測する。③Al-Sn 合金と Al-Zn 合金の水素製造実験では, 過去に優れた結果を残した Sn¹⁾ と, 水素製造量を増加させた Zn を選定した。実験では, 水と Al 合金を実験温度まで上昇させる。実験温度まで上昇した後に, 温度を一定に保ち, 実験時間に達するまで水素製造量を計測する。

表 1 実験条件

実験項目	粒径変化実験	Al-Sn, Al-Z 合金の水素製造実験	加熱実験
試料粉末重量 [g]	5		
水量 [ml]	80		
攪拌速度 [rpm]	1350	1350	1350 なし
温度 [°C]	60	60	30, 50, 60 70, 80, 90
実験時間 [min]	360	360	開始, 停止を 4 回繰り返す
粒径 [μm]	500~0	150~0	100~0
試料の組成 [質量パーセント]	純 Al	Al-5~40%Sn Al-5~40%Zn	純 Al

3. 実験結果と考察

3-1 加熱実験

図 2 の (a) ~ (e) に攪拌速度 1350[rpm]加熱実験の結果を示す。温度が高いほど制御性が向上する傾向があるが水素製造量は減少する傾向があった。

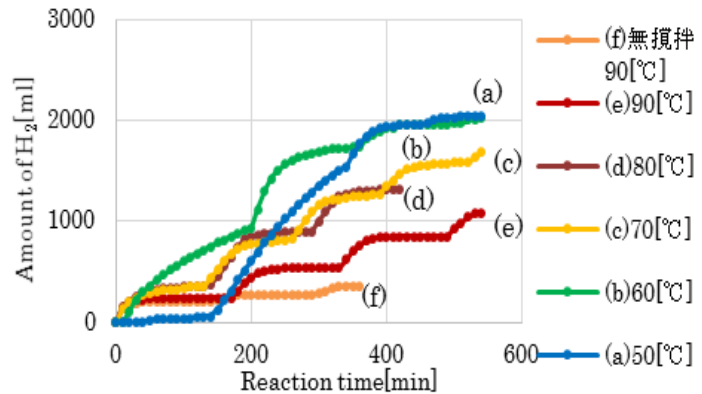


図 2 30 分ごとに温度を変化させた時の水素製造

以上より, 反応させる温度が高い場合は, 人工衛星での噴射に必要な水素を製造する際に適していることが判明した。しかし反応温度が低い場合には, 水素製造量をコントロールすることは困難なので人工衛星のエンジン操作に適していないと考えられる。高温で制御が可能になる理由として, 高温の水中で生成される水和酸化皮膜($Al_2O_3 \cdot H_2O$, $\beta-Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ 等)が反応を妨げているためであると考えられる。

図 2 の (f) に攪拌速度 0[rpm], 90[°C]の場合を示す。無攪拌の場合においても, 制御性があることが判明した。しかし, 攪拌がある場合より水素製造量が大幅に減少することが判明した。水素製造量が減少した原因としては, Al 粒子が堆積し, 隣接する Al 粒子どうしが密着するた

め、水との接触面積が小さくなったためであると考えられる。

3-2 粒径変化実験の結果

図3に粒径変化実験の結果を示す。粒径が細かいほど水素製造量は大幅に増加することが判明した。実験開始から360[min]後におけるAl(粒径:20~0[μ m])の水素製造効率(計測値を理論値で割った値)は77.8%である。また、Al(粒径:20~0[μ m])は、実験開始から2270[min]後に6650[ml]の水素を計測した。水素製造効率は99.5%であった。これは、粒径が小さくなるに従い、水との接触面積が大きくなり、水素製造量が増加するためと考えられる。

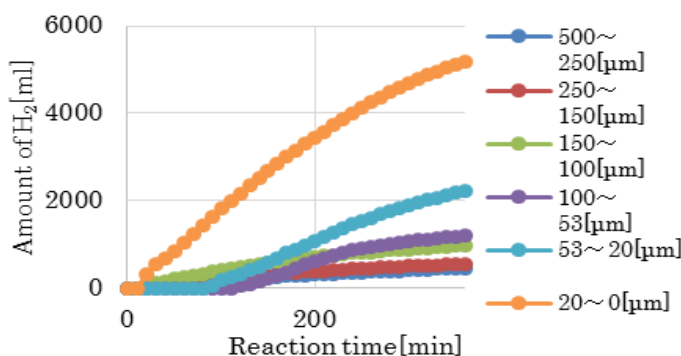


図3 種々の粒径のAl粉末による水素製造(60[$^{\circ}$ C])

3-3 Al-Sn合金とAl-Zn合金による水素製造実験

図4にAl-Sn合金を示し、図5にAl-Zn合金の水素製造結果を示す。どちらの合金においても添加金属が多いほど水素製造量が多くなる傾向がある。しかし、Al-5%Snでは添加金属が少ないにもかかわらず水素製造量が大きいことが判明した。また、全てのAl-Sn合金において、常温で水と接触するだけで水素が発生することを目視観察で確認した。

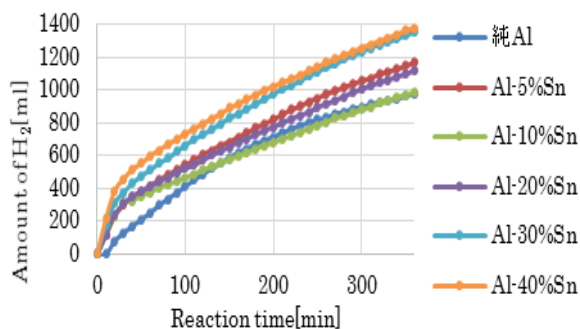


図4 Al-Sn合金による水素製造

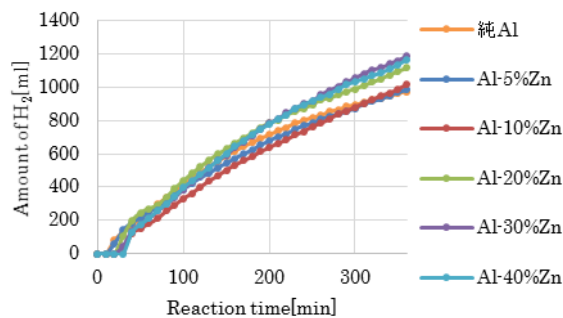


図5 Al-Zn合金による水素製造

一方、Al-Zn合金は水と常温で接触しただけでは水素は発生しなかったが、常温より高い温度では水素が発生する可能性がある。

4. 衛星等への適用検討

4-1 純アルミ-水反応方式と他の方式との比較

質量50kg程度の小型衛星の推進系に純アルミ-水反応を利用した際と他の方式(窒素ガスジェット、ヒドラジンガスジェット等)を適用した場合のシステムトレードオフ検討を行った。純アルミ-水反応を利用した方式は推進系として搭載質量的に成立する可能性があり、他の方式に比べ「完全無毒」や「高圧ガス非該当」等、安全上有利であることが判明した。

4-2 噴射試験

図6に噴射試験の結果、図7に実験装置の詳細を示す。水素ガスの噴射試験を行い、発生水素ガスのみで理論上に近い比推力が得られる可能性が示された。また、水素ガスに発生液を加えて噴射試験を実施したところ、ノズル（スロート径 0.5[mm]）は氷等で閉塞せず、比推力が増加（水素+水では 639.4[s]、水素+30[%]実液では 523.7[s]）することが判明した。発生液が推力増加に寄与する可能性がある。

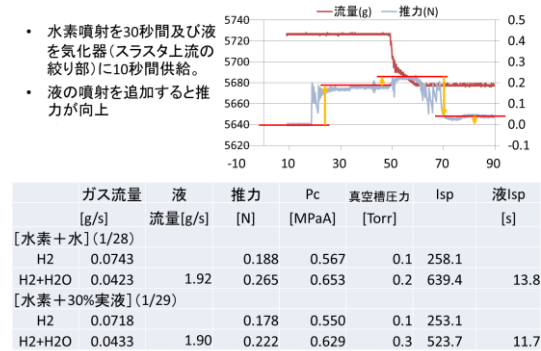


図6 噴射試験の結果

- 噴射中にスラスタの推力、プレナムチャンバ圧力、水素ガス流量、タンク質量（液の流量を知るため）等を計測。噴射時の様子を確認。
- 比推力等を算出。

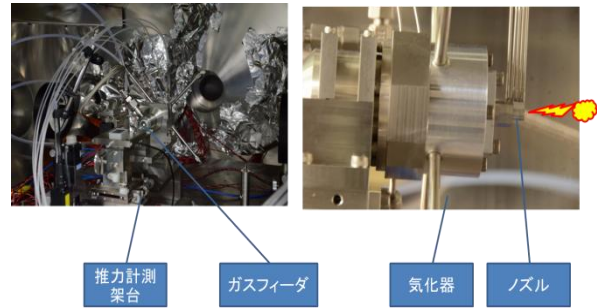
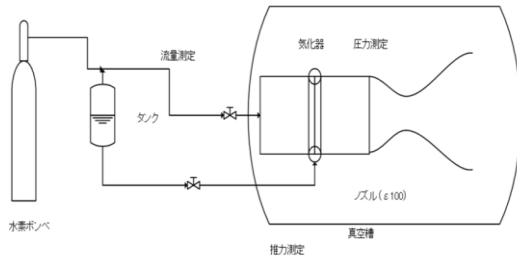


図7 実験装置

5. 結言

本研究により明らかになった結果を以下に示す。

- 加熱実験：純 Al では、反応させる温度が 70~90[°C]の場合は水素製造の制御は容易であり、宇宙機の推進系に適していると考えられる。
- 粒径変化実験：粒径が 20~0[μm]の場合、水素製造量は大幅に増えることが判明した。
- Al-Sn 合金と Al-Zn 合金の水素製造実験：Al-Sn 合金は常温で水と反応して水素を発生させるが、Al-Zn 合金においても常温以上では水素が発生する可能性がある。
- 小型衛星に本反応を利用した際と他推進（窒素、ヒドラジン等）と比較を行い、成立の可能性があること及び他の方式に比べて有利なことを示した。
- 水素ガスに発生液を追加すると性能が向上することが試験で判明した。残物質がデッドマスにならない可能性が示された。

今後の課題を以下に示す。

- ①Al 合金推進系の制御方法を確立。

本実験では純 Al の制御方法を確立したが、Al 合金の制御方法は確立していない。水素製造を制御できる Al 合金を開発する。

- ②Al-Sn 合金以外の常温でも水と反応する Al 合金粉末の開発。

Al-Sn 合金のような添加金属が少なくても常温で水と反応する Al 合金を開発し、宇宙機推進系に適用する。

- ③水素製造能力の高い Al-5[%]Zn-5[%]X, Al-5[%]Sn-5[%]X (X=In, Ga, Sb, Ni 等)を開発。

Al-5[%]Zn 合金, Al-5[%]Sn 合金に他の合金を加え、さらに水素製造能力の高い合金開発を行う。

- ④アルミ-水反応の現象の詳細を把握及び最適条件の調査を行う.
- ⑤アルミ-水反応の生成物の物性評価及び分析を行う.
- ⑥微小重力下での固気液分離装置を考案し, 発生した水素を固液から分離する.
- ⑦本推進系のシステム検討を継続する.

参考文献

- 1) 近藤光輝, 東野和幸, 杉岡正敏: 宇宙機推進システムとしての AI と水との反応を利用した常圧および高圧水素製造に関する研究, 第 53 回航空原動機・宇宙推進講演会要旨集 (2013)