

2. 研究開発テーマ毎の成果

2.1 研究開発項目 A「燃料電池自動車に係る規制再点検および標準化のための研究開発」

(1) 水素・燃料電池自動車の基準・標準化に係る研究開発

① 水素・燃料電池自動車の安全性評価

a. 自動車用圧縮水素容器および搭載車両の安全性評価

2004年、我が国では燃料電池自動車の実用化を図ることを目的に、圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準（JARI-S001）および附属品の技術基準（JARI-S002）が公布された。しかし、普及促進を図るには、安全性を前提とした技術基準を合理化する必要がある。さらに、圧縮水素を燃料とする燃料電池自動車の安全基準を定める道路運送車両法の見直し、国連欧州経済委員会自動車基準調和世界フォーラム（UN-ECE/WP29）での世界統一基準（gtr: global technical regulation）の調和も重要課題である。これらの技術基準改訂に向けたデータを取得する上で、以下の課題について検討し、基準・標準化に資する基礎データを取得した。

圧縮水素自動車燃料装置用容器技術基準（JARI-S001）の合理化検討

- ・試験サイクル数の見直し
- ・使用温度範囲の見直し
- ・シリーズ試験の導入検討と最高充填圧力試験の見直し
- ・その他（ガンファイヤ試験・静電気帯電試験）
- ・充填シミュレーションの開発

道路運送車両法の基準見直し・国際基準調和活動（UN-ECE gtrなど）対応

- ・水素漏れ許容量の安全確認
- ・長尺容器および局所火炎暴露試験
- ・水素火災の周囲影響
- ・消火活動に対する安全情報
- ・駐車場や船舶輸送に関わる課題

ア. 圧縮水素自動車燃料装置用容器技術基準（JARI-S001）の合理化検討

(A) 試験サイクル数の見直し

現在、使用実態に合った合理的な基準改定のため、常温圧力サイクル試験の加圧回数を11、250回から5、500回に、応力比（＝最小破裂圧力/最高充填圧力）を2.25から1.8（end of life）に見直すかどうか検討されている。そこで、サイクル回数や応力比の適正化を図るため、以下の5項目を調査した。

- i) 圧縮水素容器の疲労寿命に及ぼす上限圧力の影響
- ii) VH3 容器の疲労寿命に及ぼす下限圧力の影響

- iii) VH3 容器の疲労寿命に及ぼす圧力媒体の影響
- iv) VH3 容器の疲労寿命に及ぼす加圧速度の影響
- v) VH4 容器の残留破裂強度に及ぼす圧力サイクルの影響

i) 圧縮水素容器の疲労寿命に及ぼす上限圧力の影響

<目的>

応力比とサイクル数の関係についての知見があまりない。そこで、常温圧力サイクル試験で定められるサイクル回数および破裂試験の応力比（＝最小破裂圧力/最高充填圧力）の適正化を図るために、上限圧力を最高充填圧力の 100%、125%、150%、175%、200%として常温圧力サイクル試験を実施し、圧力サイクル試験の上限圧力が容器疲労過程にどのような影響を与えるかを調査した。

<方法>

試験容器の概要

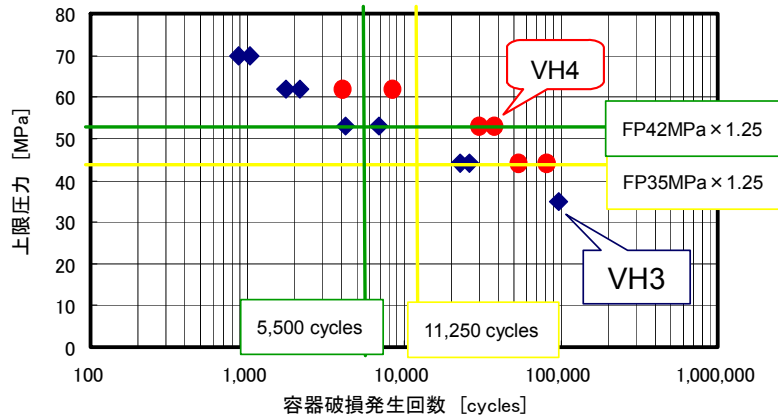
容器仕様	VH3 容器	VH4 容器
最高充填圧力 (FP) [MPa]	35	35
内容積 [L]	34	64
外径×長さ [mm]	φ280×830	φ400×832
ライナー材料	Al (A6061-T6)	HDPE

<結果>

上限圧力を最高充填圧力の 100%、125%、150%、175%、200%として常温圧力サイクル試験を実施し、圧力サイクル試験の上限圧力が容器疲労過程にどのような影響を与えるかを調査した。その結果、以下のことが分かった。

- 1) 圧力サイクル試験の上限圧力が高いほど、疲労寿命は短くなる傾向がある。
- 2) 供試 VH3 容器（アルミニウム合金ライナー製複合容器）の寿命はライナー材料の疲労曲線に似た傾向を持つ。
- 3) 供試 VH4 容器（プラスチックライナー製複合容器）の疲労寿命は供試 VH3 容器よりも長い。その寿命形態はリークではなく、破裂するケースがある。

よって、常温圧力サイクル試験の加圧回数を 11、250 回から 5、500 回に、応力比（＝最小破裂圧力/最高充填圧力）を 2.25 から 1.8 (end of life) に見直すかどうか検討されている基準を満たす容器の設計は可能であるといえるが、寿命形態とその要求されるサイクル数の規定には、さらに検討が必要である。



上限圧力-容器の損傷発生サイクル数線図

	FP35MPa × 1.25 43.75MPa	FP35MPa × 1.50 52.5MPa*	FP35MPa × 1.75 61.25MPa*
VH3	 リーク発生	 リーク発生	 リーク発生
VH4	 リーク発生(経路不明)	 容器破裂	 容器破裂

*設計圧力を超える圧力

サイクル試験終了時の状況


ii) VH3 容器の疲労寿命に及ぼす下限圧力の影響

<目的>

部分充填によって寿命がどのように変化するか解明されていないため、適正な安全率の根拠を見出す必要がある。そこで本報告では、自動車用圧縮水素容器 (VH3) に、下限圧力を変えた圧力サイクル試験を実施して、下限圧力が圧縮水素容器の疲労寿命にどのような影響を与えるかを調査することを目的とした。

<方法>

供試容器の仕様

Type	Filling Pressure	Volume	Diameter	Liner Material	Appearance
VH3	35 [MPa]	28 [L]	φ280×730 [mm]	Aluminum Alloy (A6061-T6)	

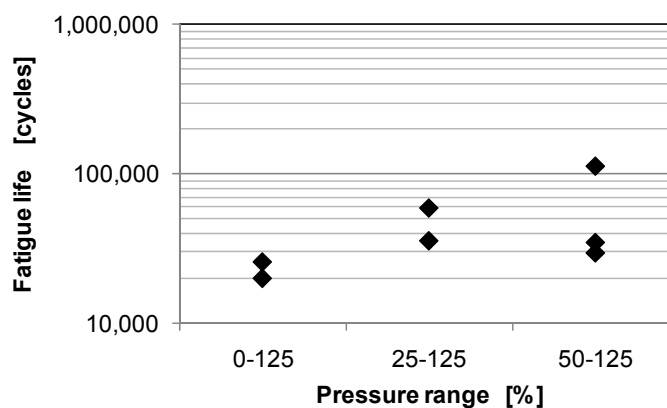
圧力サイクル試験条件

	0-125%	25-125%	50-125%
Minimum Pressure	0 MPa (FP* × 0%)	8.75 MPa (FP × 25%)	17.5 MPa (FP × 50%)
Maximum Pressure	44MPa (FP × 125%)		
Temperature	20 ± 5 °C		
Fluid (Medium)	Deionized Water		
Frequency	15 sec/cycle		
Waveform	Sine Curve		
Termination	Occurrence of Leak Before Break		

*FP : Normal Filling Pressure = 35 MPa

<結果>

下限圧力が高くなると、寿命が伸びる傾向が得られた。しかし、寿命が伸びるレベルは圧力に比例するわけではなかった。25-125%設定と 50-125%設定を比較すると、N=2 以上で実施した各条件で、寿命の短かかった容器の寿命はほとんど同じだが、50-125%設定では、寿命が伸びる側にばらつきが大きくなった。



下限圧力と疲労寿命の関係

iii) VH3 容器の疲労寿命に及ぼす圧力媒体の影響

<目的>

JARI S001 (2004) 第 11 条常温圧力サイクル試験では、圧力媒体となる液体の種類は規定されていない。そこで本報告では、自動車用圧縮水素容器 (VH3) に、圧力媒体をイオン交換水およびフッ素系媒体 (Perfluoropolyether) を使用した圧力サイクル試験を実施して、圧力媒体が圧縮水素容器の疲労寿命にどのような影響を与えるかを調査することを目的とした。

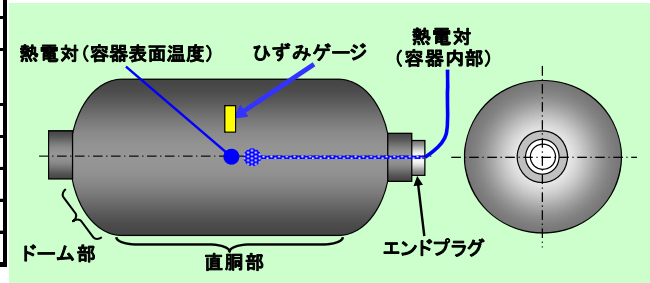
<方法>

圧力サイクル試験条件

	イオン交換水	フッ素系液体
試験温度	15~25℃	15~25℃
試験湿度	-	-
充填媒体	イオン交換水	フッ素系液体 (Perfluoropolyether)
上限圧力	FP (70MPa) × 125% = 87.5MPa以上	
下限圧力	1.0MPa以下	
加圧頻度	15 sec/cycle	
加圧波形	サイン波	
加圧回数	破損発生まで	

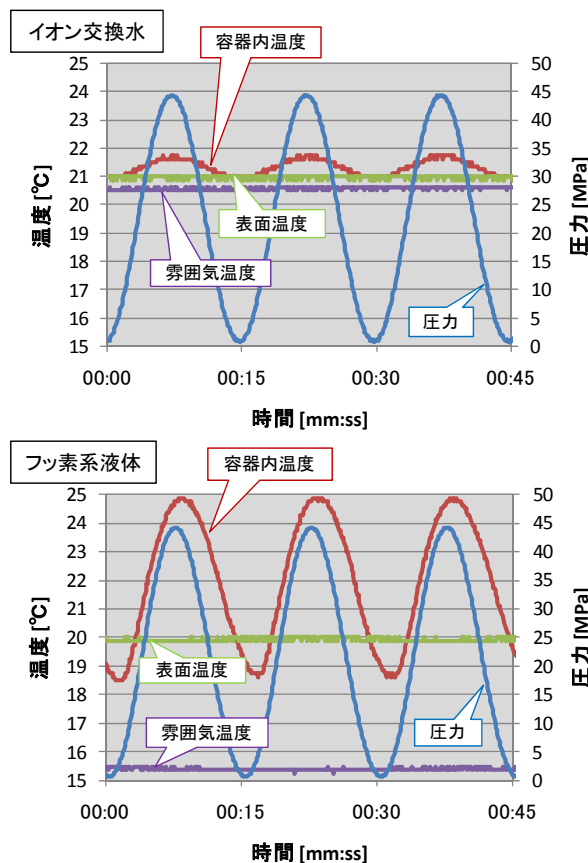
*FP: Filling Pressure

試験容器の温度・ひずみ測定方法



<結果>

イオン交換水の場合は、雰囲気温度を 20℃設定とし、容器内温度が 21℃±1℃となった。一方、フッ素系液体の場合、水よりも圧縮係数が高く、圧縮による発熱が大きいいため、雰囲気温度を 15℃と設定して、容器内温度は 18~25℃の間を振幅した。



VH3 容器の圧力サイクルおよび温度変化一例

圧力媒体をイオン交換水およびフッ素系液体としたときの圧力サイクル試験を実施した結果、イオン交換水の場合、19,994 回および 25,569 回で LBB が発生した。一方、フッ素系

液体の場合、17、934 回および 18、081 回で LBB が発生した。よって、不活性液体であるフッ素系液体とイオン交換水のどちらを使っても同等の寿命となることがわかった。つまり、不活性液体であるフッ素系液体と比べて、イオン交換水は VH3 容器の疲労寿命に悪影響を及ぼさないと考えられる。以上より、常温圧力サイクル試験の圧力媒体を規程する必要がないことが分かった。

iv) VH3 容器の疲労寿命に及ぼす加圧速度の影響

<目的>

JARI S001 (2004) 第 11 条常温圧力サイクル試験では、加圧速度は、1 分間あたりのサイクル数=10 回以下 (6 秒/サイクル以上) と定義されている。しかし、1 分間あたりのサイクル数がどの程度劣化に影響を及ぼすのかの根拠データが得られていない。そこで、自動車用圧縮水素容器 (VH3) に、加圧速度を変えた圧力サイクル試験を実施して、加圧速度が圧縮水素容器の疲労寿命にどのような影響を与えるかを調査した。

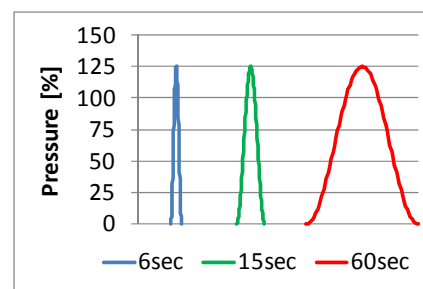
<方法>

本試験では、VH3、35 MPa、28 L の圧縮水素容器を使用した。

各試験温度での圧力サイクル試験条件

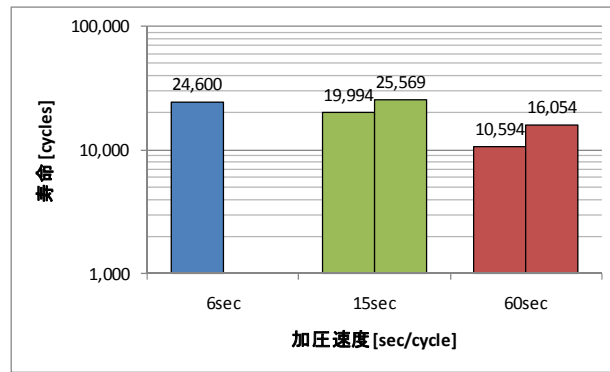
	6sec	15sec	60sec
試験温度	室温		
上限圧力	43.75 MPa (FP × 125%)		
下限圧力	0 MPa (FP × 0%)		
充填媒体	イオン交換水		
加圧速度	6 sec/cycle	15 sec/cycle	60 sec/cycle
加圧波形	サイン波		
加圧回数	破損発生まで		

*FP : Normal Filling Pressure = 35 MPa



<結果>

6 sec/cycle と 15 sec/cycle を比較すると疲労寿命は変化しなかった。一方、加圧速度を 60 sec/cycle にした場合の寿命は、10、594 cycles および 16、054 cycles であり、やや疲労寿命が低下する傾向が得られた。60 sec/cycle の場合、試験期間が長くなることから、水や酸素等が亀裂進展に影響を与えた可能性が考えられる。



疲労寿命に及ぼす加圧速度の影響

v) VH4 容器の残留破裂強度に及ぼす圧力サイクルの影響

<目的>

圧力サイクルが破裂圧力に与える影響は明らかにされておらず、問題点が抽出できていない。このため、常温圧力サイクル試験後に破裂圧力がどれだけ低下するか、また、常温圧力サイクル試験の上限圧力を変えた場合の影響を調査した。

<方法>

常温圧力サイクル試験は、「JARI S001」第 11 条（設計確認試験における常温圧力サイクル試験）を参照して実施した。未使用容器および設定した圧力サイクル数が終了した容器について、水加圧試験装置（破裂用）を用いて破裂試験を実施した。

供試 VH4 容器

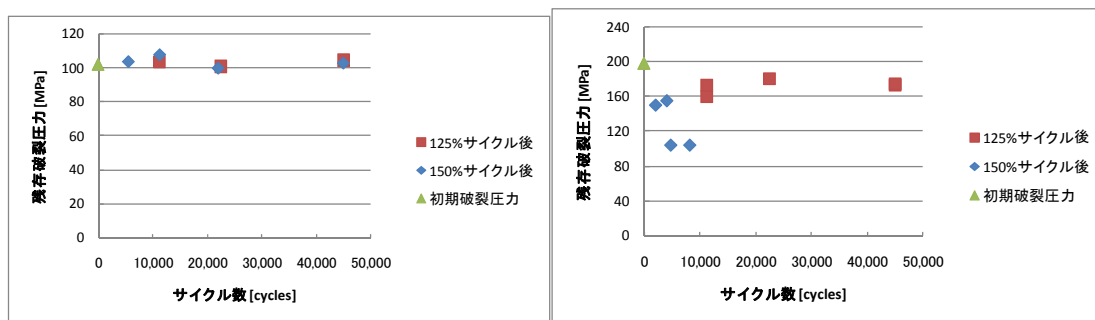
容器仕様	VH4	VH4
最高充填圧力 [MPa] (Filling pressure:FP)	35	70
内容積 [L]	40	40
外径 [mm]	φ287	φ310
長さ [mm]	884	884

常温圧力サイクル試験条件

圧力媒体	イオン交換水
媒体温度	24±14℃
下限圧力	0 MPa
上限圧力	パラメータ A (FP×125%~150%)
加圧頻度	4 cycles/min.
加圧回数	パラメータ B (2,000~45,000 回)

<結果>

上限圧力およびサイクル回数を変えて常温圧力サイクル試験を行った後、破裂試験を行い、残存破裂強度を調査した。35MPa 供試容器について、サイクル後の残存破裂圧力は初期破裂圧力と変わらなかった。つまり、圧力サイクルによる残存破裂強度の低下は起こらなかった。70MPa 供試容器については、125%サイクルによって、サイクルの初期に若干破裂圧力が低下したが、その後は、長期間サイクルを行っても破裂強度の低下は起こらなかった。150%サイクルでも、サイクルの初期に破裂強度が低下した。また、サイクル中に容器破損による漏洩が起こった。70MPa 供試容器は、圧力サイクルによって残存破裂強度が低下したと考えられる。以上より、最高充填圧力が高い容器ほど、圧力サイクルによる残存破裂強度の低下が起こりやすい傾向があることがわかった。



35MPa VH4 供試容器

70MPa VH4 供試容器

圧力サイクルと残存破裂強度の関係

(B) 使用温度範囲の見直し

<目的>

圧縮水素容器に急速充填する際、条件によっては、現行基準で定められている容器の使用上限温度 85°Cを超えることがある。また、車両動力が高負荷時における水素消費時では、自動車用圧縮水素容器は著しい温度低下を伴うことが想定される。そこで、急速充填や消費時などによる容器の使用温度に対する適正化を図るため、以下の試験を行った。

(i) 急速充填試験

(ii) 水素消費試験

(iii) その他

極端温度圧力サイクル試験

VH3 容器の疲労寿命に及ぼす環境温度の影響

VH4 容器の残存破裂圧力に及ぼす圧力サイクル試験温度の影響

(i) 急速充填試験

<目的>

容器の急速水素充填試験を実施し、容器への水素充填時における容器内の急激な温度上昇現象を詳細に調査し、容器の温度特性などの基礎データを構築することを目的とする。急速充填時の容器の温度上昇に影響を与える要因として、以下について調査を実施した。

- i-①充填時間
- i-②圧力上昇パターン
- i-③容器への充填方法（容器内部でのガス噴出ノズルの口径、噴出方向）
- i-④充填ガス温度

また、ステーションにおける自動車への充填を想定すると、充填時の容器や設備の状況がベンチテストとは異なるため、上記の試験で得られた結果との相違の検証や、容器の温度特性の、より詳細な調査を行う必要があり、以下の試験を実施した。

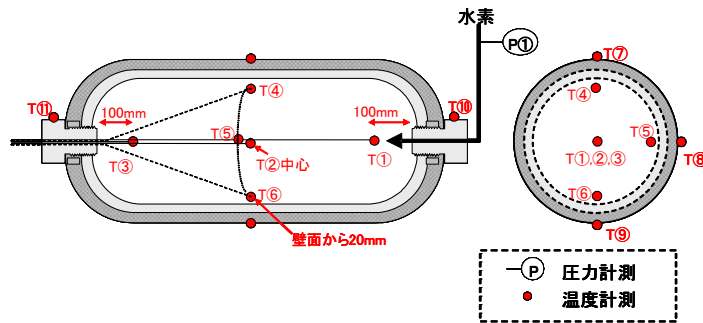
- i-⑤ノズル／レセプタクルにおける絞りの影響
- i-⑥ライナー温度とガス温度の関係
- i-⑦容器内ガス代表温度計測位置の影響
- i-⑧複数容器による急速充填
- i-⑨充填数値シミュレーションの開発

<方法>

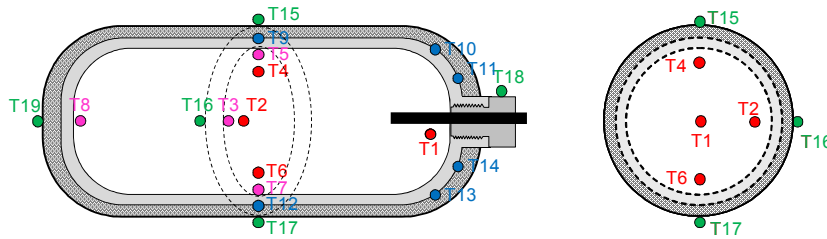
試験容器

使用圧力	35[MPa]		
容器種類	VH3(Aluminum Liner)		VH4(Plastic Liner)
内容積	34[L]	74[L]	65[L]
外径－全長[mm]	D280-L830	D400-L910	D400-L832

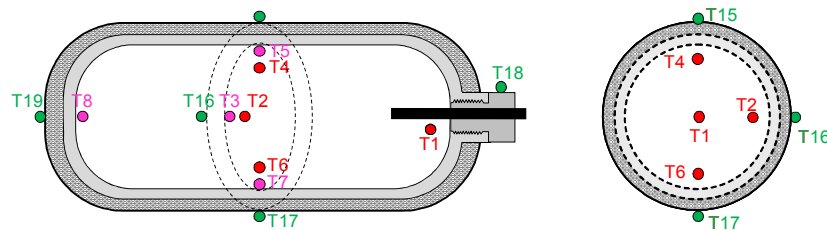
使用圧力	70[MPa]				
容器種類	VH3(Aluminum Liner)		VH4(Plastic Liner)		
内容積	41[L]	125[L]	31[L]	40[L]	51[L]
外径－全長[mm]	D290-L1030	D600-L1000	D360-L600	D300-L900	D400-L750



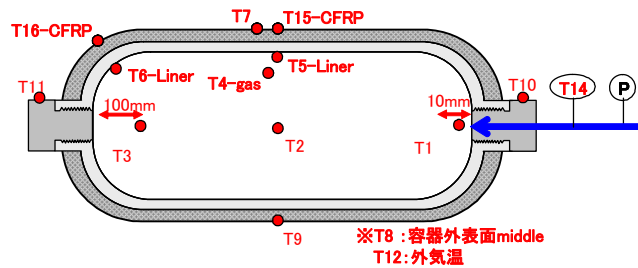
容器温度計測位置(35MPa 容器、70MPa-VH3-41L 容器、70MPa-VH4-31L 容器)



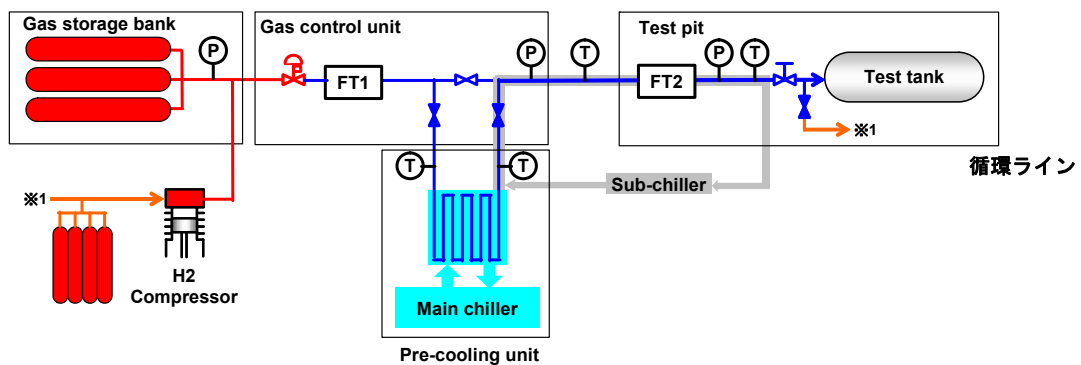
容器温度計測位置(70MPa-VH4-40L 容器)



容器温度計測位置(70MPa-VH3-125L 容器、70MPa-VH4-51L 容器)



容器温度計測位置(ライナー温度とガス温度の関係調査)



充填試験設備

<結果>

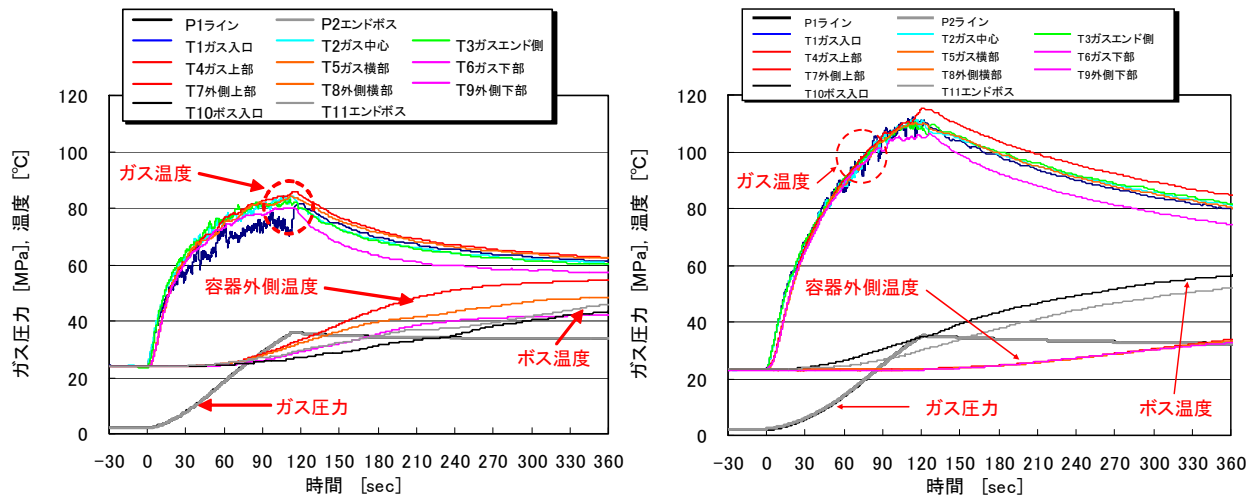
i-① 充填時間が容器内温度上昇度に及ぼす影響

試験条件

試験は、初期圧力を 2[MPa]として、充填時間を変えて 35[MPa]および 70[MPa]まで水素を充填した。それぞれの試験において、圧力上昇率は一定になるよう制御した。35[MPa]試験容器は、VH3 容器の 34[L]と 74[L]及び VH4 容器の 65[L]の 3種類を使用した。

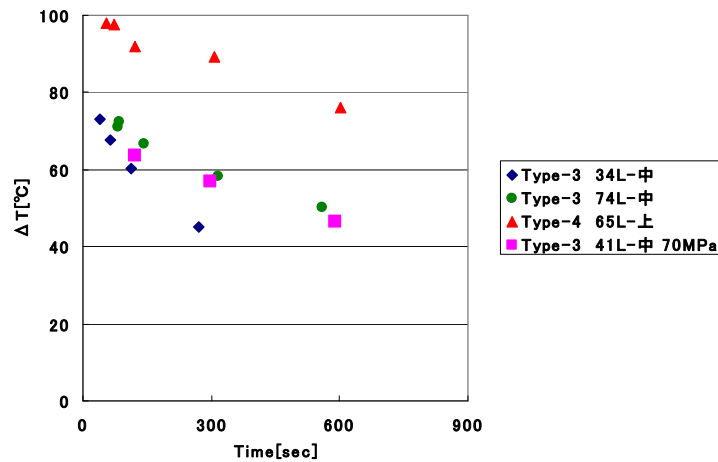
試験結果

VH4 容器の容器内上部ガス温度は、充填時間 79[sec]の時に最高温度 120[°C]（温度上昇度 98[°C]）に達した。一時的ではあるが、環境温度によっては容器内温度が容器設計確認試験温度である 85[°C]を超えるケースもあることから、改めて充填時の容器内温度上昇には注意が必要であることがわかった。また、試験の結果、試験条件により容器内各部の温度上昇に温度差が見られ、その傾向は特に上下方向に顕著であることがわかった。



VH3 35[MPa]114[sec]充填

VH4 35[MPa]122[sec]充填

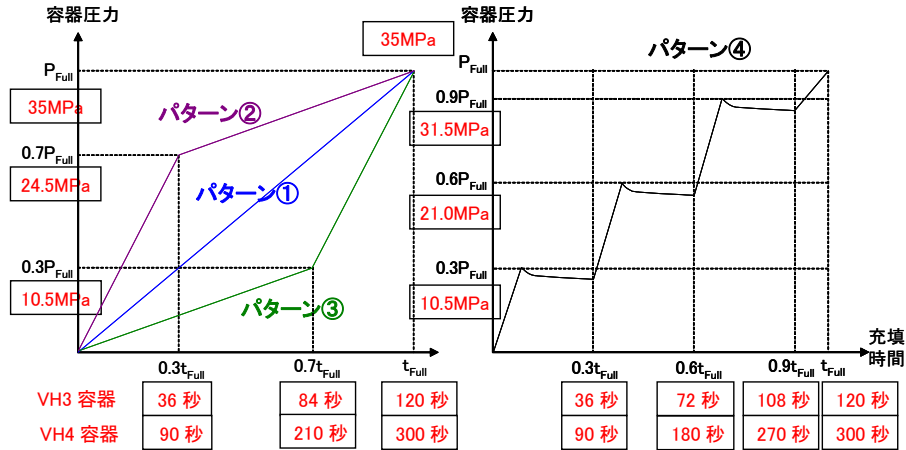


充填速度の違いのまとめ

i-② 圧力上昇パターンが容器内温度上昇度に及ぼす影響

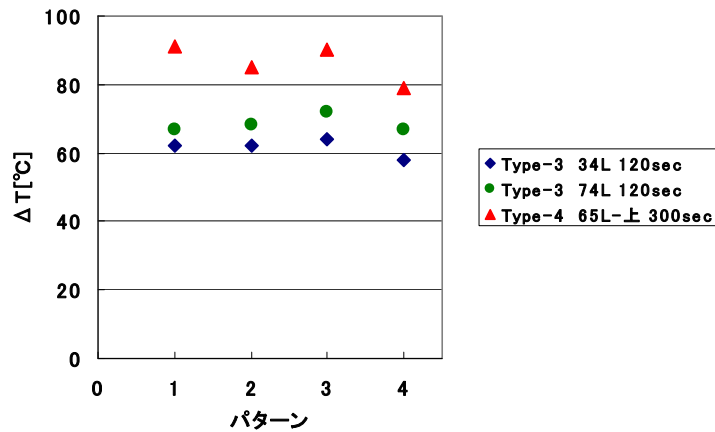
試験条件

初期圧力を 2[MPa]として、圧力上昇パターンを変えて 35[MPa]まで水素を充填した。試験容器は、VH3 容器の 34[L]と 74[L]及び VH4 容器の 65[L]の 3 種類を使用した。



試験結果

同じ容器では圧力上昇パターンの違いによる著しい温度差は見られなかったが、容器の違いによって温度上昇度が異なり、特に VH4 容器では、300[sec]充填においても一時的ではあるが、容器設計確認試験温度である 85[°C]を超えるケースもあった。



35[MPa]圧力上昇パターン充填のまとめ

i-③ 充填流速と充填方向の影響

これまでの試験により、充填中の局所的な温度上昇により容器内ガス温度には分布がみられることが確認されている。そこで、充填時の容器内温度分布を抑える方法として、容器内部への水素ガスの噴出方法に着目し、VH4 容器への充填流速および噴出方向をパラメータとする充填試験を行い、容器内ガス温度分布との関係について調査した。

イ) 充填流速の影響

試験条件

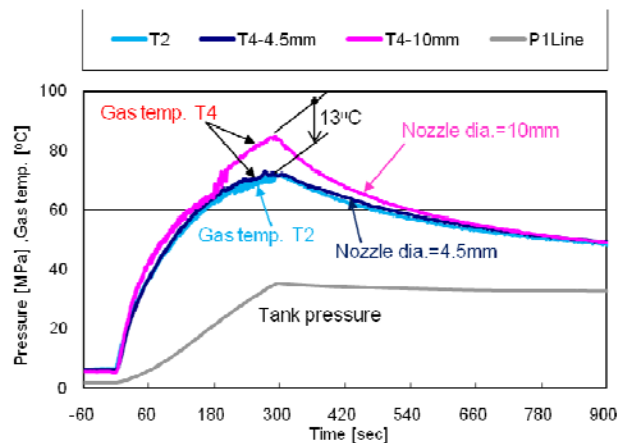
試験容器は、VH4 容器 2 種類（35MPa-65L、70MPa-40L）を使用した。温度計測位置は、容器内ガス温度 2 点（中心部 T2 および上部 T4）および充填ガス温度とし、また、充填圧力の計測は、容器入口の配管圧力の計測を行った。また、本試験では充填時の容器内部への噴出流速も計測した。噴出流速の計測は、容器入口直前の圧力計および温度計の上流に設置した流量計によって瞬時流量（質量流量）を計測し、計算によって求めた。

試験条件

Tank Type	VH4-35MPa-65L	VH4-70MPa-40L
Filling pressure[MPa]	35	70
Filling Pattern	Constant rate of pressure rise	
Nozzle diameter [mm]	10 / 8.5 / 7 / 4.5	7 / 5 / 3
Filling rate [MPa/min]	2.5 / 6.6 / 12.5	4.5 / 6.9 / 11.5

試験結果

VH4-35MPa-65L 容器の充填速度 6.6[MPa/min]における、噴出口径 10[mm]と 4.5[mm]の、容器内ガス温度挙動を比較した。噴出口径 4.5[mm]では、これまでみられた上部ガス温度（T4）の局所的な温度上昇がなくなり、温度上昇度は 13[°C]低下する結果となった。

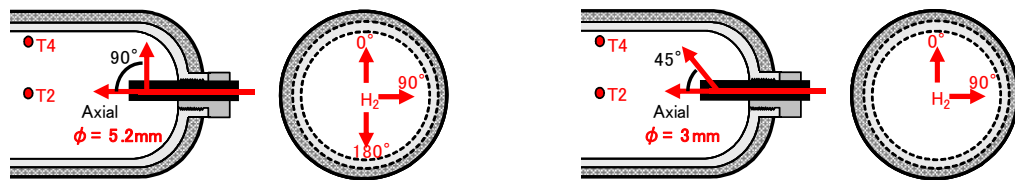


容器内ガス温度挙動の比較(6.6[MPa/min])

ロ) 充填方向の影響

試験条件

ガス噴出方向を変える方法として、噴出方向変更用の治具を製作し、充填する水素ガスの流れの向きを変えて容器内に噴出させるようにした。噴出方向は上方向の場合を 0°、横方向を 90°、下方向を 180° とし、水素ガス導入方向と同じ容器長手方向に噴出する場合を Axial とした。



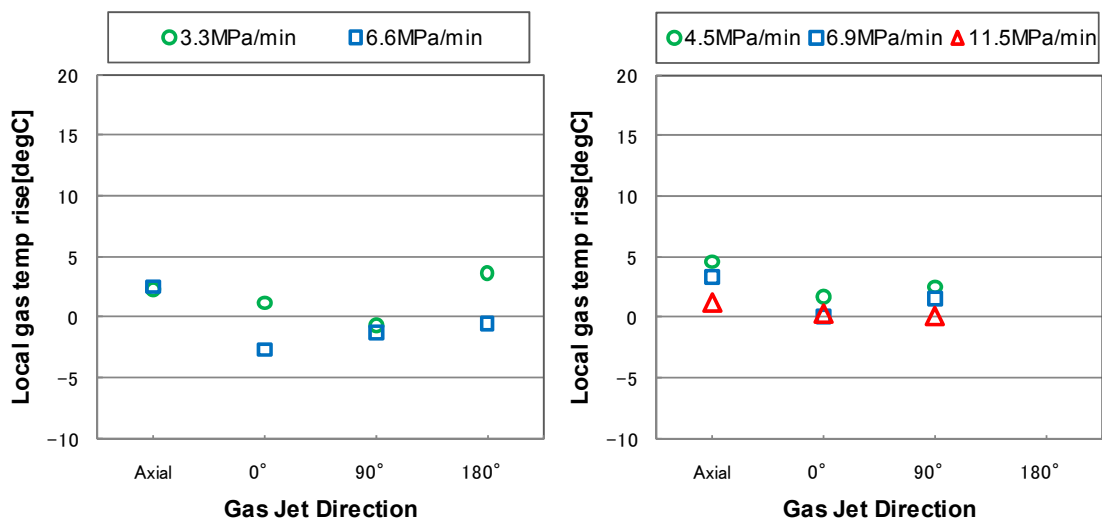
水素ガス噴出方向: 左)35MPa-65L 容器 右)70MPa-40L 容器

試験条件

Tank type	VH4-35MPa-65L	VH4-70MPa-40L
Filling pressure[MPa]	35	70
Filling pattern	Constant rate of pressure rise	
Filling Rate[MPa/min]	3.3 / 6.6	4.5 / 6.9 / 11.5
Nozzle diameter[mm]	5.2	3

試験結果

本試験ではいずれの場合も大きな局部温度上昇は見られず、噴出方向による大きな相違はなかった。噴出口径が細く、もともと局部温度上昇が生じない場合には、いずれの噴出方向でも容器内部の攪拌効果はほぼ同じで、容器内の局部温度上昇に対する噴出方向の影響は殆どないことがわかった。



35MPa-65L 容器

70MPa-40L 容器

噴出方向と局部温度上昇度の関係($\Delta T4 - \Delta T2$)

i-④ 充填ガス温度の影響

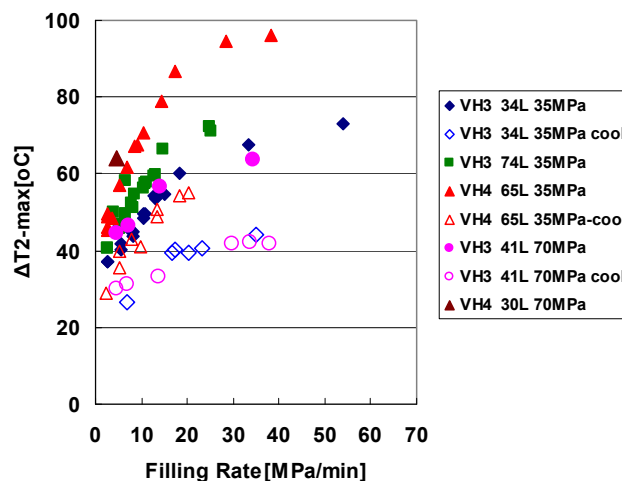
充填時の容器内ガス温度上昇を抑え、かつ短時間での充填を達成する充填方式として、予め充填ガスの温度を冷却するプレクール充填方式が検討されており、プレクール充填方式による流入ガス温度の違いが容器温度上昇に与える影響について調査した。

試験条件

試験容器は、35[MPa]-VH3 容器（内容積 34[L]及び 74[L]）、35[MPa]-VH4 容器（内容積 65[L]）及び 70[MPa]-VH3 容器（内容積 41[L]）を使用した。試験は、充填時間の違い及び圧力上昇パターンの違いによる充填方法でプレクール試験を実施した。充填時間の違いでは、初期圧力を 2[MPa]とし、充填時間を変えて 35[MPa]及び 70[MPa]まで水素を充填し、圧力上昇率は一定になるよう制御した。また、圧力上昇パターンの違いでは、圧力上昇度を変化させた場合のデータ比較を行った。パターン充填における充填時間は、35[MPa]容器は 2 分、70[MPa]容器は 5 分とした。容器への供給水素ガス温度は $-5\sim-22[^\circ\text{C}]$ であり、試験時の環境温度は約 $7\sim25[^\circ\text{C}]$ であった。

試験結果

各容器への充填において、常温充填とプレクール充填による容器の温度上昇度をまとめた。 $\Delta T2\text{-max}$ は、充填開始時の容器内温度と充填中の容器内最高温度との差であり、温度測定箇所は容器内中央部ガス温度(T2)である。このように、プレクール充填を行うことで、容器内ガスの最高温度を低く抑えて充填することが計測された。また、プレクールの効果は、充填速度が速いほど大きいことが分かった。



充填速度の違いによるプレクール効果のまとめ

i-⑤ノズル／レセプタクルにおける絞りの影響

本試験では、ノズル・レセプタクルをガス流路に設置した状態で急速充填試験を行い、急速充填時の容器内ガス温度上昇度に及ぼすノズル・レセプタクルの影響を調べるとともに、これまで蓄積したデータの有効性について検証した。

試験条件

試験容器は、VH3-35[MPa]容器（内容積 34[L]）を使用した。また、ガス流路に設置したノズル・レセプタクルは 35[MPa]用（日本製）を使用した。試験は、従来の試験フローに加え、試験容器の手前に 35[MPa]用ノズル／レセプタクルを設置し、その前後に挿入した温度計に

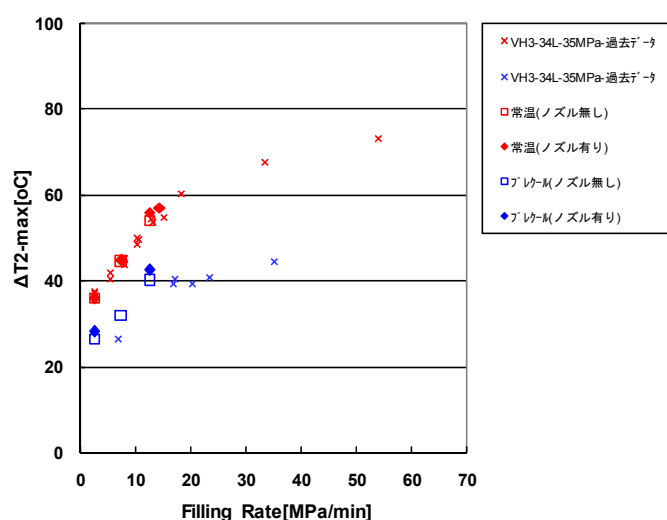
よりノズル／レセプタクル前後の温度挙動を確認した。

試験条件

初期圧力	2 [MPa]
充填圧力	35 [MPa]
充填速度	2.5、7.5、12.5[MPa/min]
充填温度	常温、プレクール

試験結果

試験の結果、常温充填時においては、充填速度に関わらずノズル／レセプタクル部前後での温度上昇は見られず、ノズル／レセプタクルの有無による容器内温度上昇の差は見られなかった。よって、ノズル／レセプタクル部の絞りの影響による温度上昇は無いものと考えられ、また、従来の試験フロー(ノズル／レセプタクルが無い状態)で蓄積されたデータも十分に活用できることが確認された。



容器内ガス温度上昇度(ΔT2) まとめ

i-⑥ライナー温度とガス温度の関係

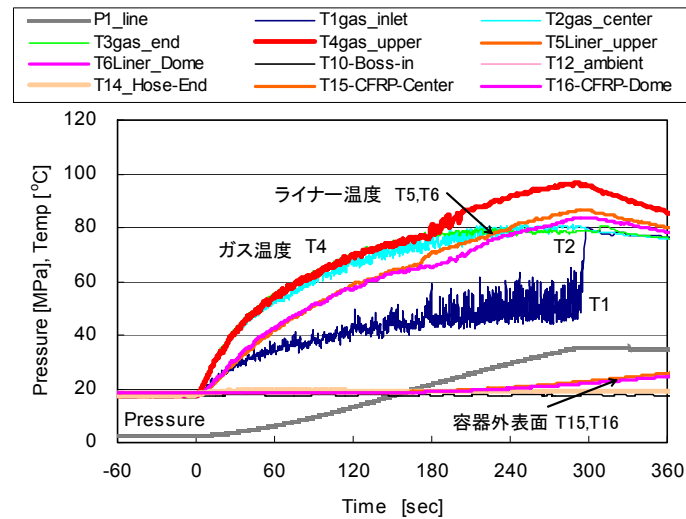
容器内のライナー温度を直接計測する手法によって、VH3 容器における容器内ガス温度とライナー温度の関係を調査した。

試験条件

容器は、35[MPa]-VH3 (内容積 34[L]) 及び VH4 容器 (内容積 65[L]) を使用した。ライナー内表面温度は、容器中央上部と容器肩上部の 2 ヶ所を計測し、対応する容器外表面温度も計測した。また、試験容器のライナー内表面温度計測は、アルミニウムテープを用いて熱電対をライナー内表面に貼り付ける方法で実施した。

試験結果

容器内ガス温度は充填開始とともに急激に上昇するが、容器内ライナー表面温度はガス温度の上昇に伴って緩やかに上昇した。充填終了時、容器内ガス温度、容器内面ライナー温度はともに最高温度に達するが、充填後すぐに容器内ガス温度が緩やかに下降するのに伴い、ライナー温度も下降を始めた。また、VH4 容器では、上部ライナー温度が、充填途中に中心ガス温度(T2)を上回る傾向がみられ、容器内部温度を中心ガス温度で規定することが、必ずしも妥当ではないことが確認された。



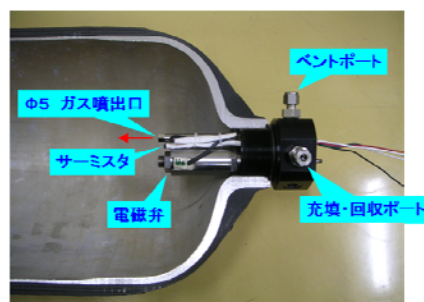
35[MPa]-VH4-65[L]ライナー温度計測結果(295[sec])

i-⑦容器内ガス代表温度計測位置の影響

車載容器においては、容器の温度計測は通常容器内ガス温度 1 点のみである。そのため、充填時にこのガス温度が、容器内のガス温度を代表しているか、検証するため、市販のインタンクバルブ付属の温度計で急速充填時の温度計測を実施し、これまでのデータと比較した。

試験条件

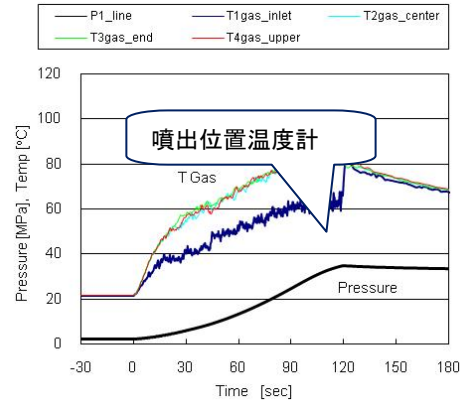
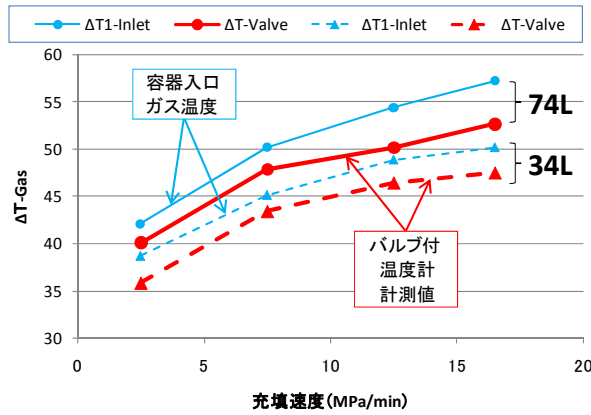
試験容器は、VH3-35[MPa]容器（内容積 34[L]、74[L]）を使用した。いずれの容器にも同じバルブを使用し、その形状は、噴出口、温度計、電磁弁が容器内部に突出した形となっている。温度計はサーミスタである。試験条件は、圧力一定上昇制御充填とした。



インタンクバルブ

試験結果

バルブ付温度計は、その付近の熱電対よりも2～5 [°C]程度低い温度を示した。この温度差は、充填速度が速く、容器内ガス温度の温度上昇勾配が大きい場合に、最も大きくなった。充填時の容器内ガス代表温度の計測は、容器内への噴出ガスが直接温度計に当たらない位置が望ましいことが分かった。



バルブ付温度計の容器入口ガス温度との比較

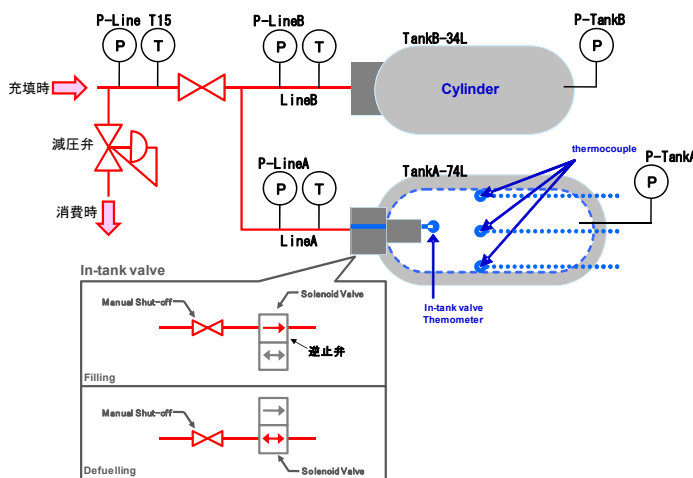
温度計位置の比較(噴出位置)

i-⑧複数容器による急速充填

実際に車両へ搭載される燃料システムは、複数本の高圧水素容器および逆止弁、バルブ類がシステム化された状態で搭載される。本試験では、それらの機器および機器の構成が及ぼす影響について調査した。

試験条件

容量の異なる2本のVH3容器(74[L]、34[L])およびインタンクバルブにより燃料システムを構成した。



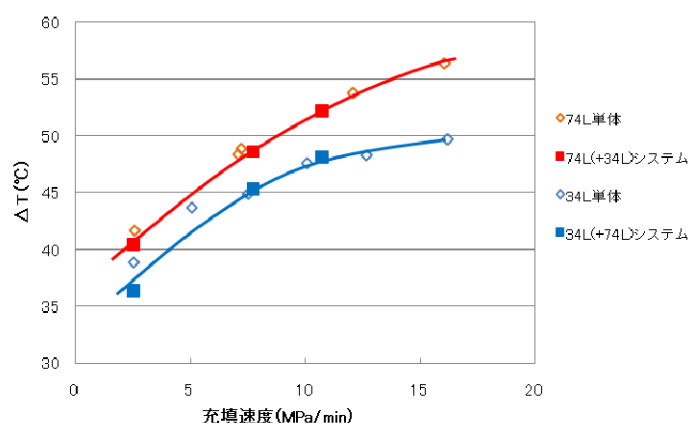
燃料システムの構成

試験条件

容器内初期圧力	2 [MPa]
充填圧力	35 [MPa]
充填速度	2.5 [MPa/min]
(圧力一定上昇制御)	7.5 [MPa/min]
	12.5 [MPa/min]
充填温度	常温

試験結果

燃料システムへの急速充填試験の結果、容器ごとの容器内ガス温度上昇度は従来の急速充填（容器単体の急速充填）と同じ傾向を示すことがわかった。また急速充填中の圧力挙動に関しても、燃料システムを構成する機器間における圧力差は無いことがわかった。したがって、容器単体への急速充填試験データを有効に活用できることが確認された。一方、温度挙動の異なる複数本の容器にインタックバルブを装着し燃料システムとして使用する場合、充填終了後の温度変化が異なることで容器間に圧力差が生じ、容器残圧がアンバランスになることが懸念される。



容器内中心温度上昇度 (ΔT) と充填速度の関係

i-⑨ 充填数値シミュレーションの開発

<目的>

本研究では、安全、かつ高効率で充填する方法を導くことを目的とし、容器内の温度分布や時間変化、そして流れの挙動を熱流体数値解析 (CFD 解析) によって3次元的に詳細に調査し、充填時における温度上昇に関するメカニズムの解明を行う。

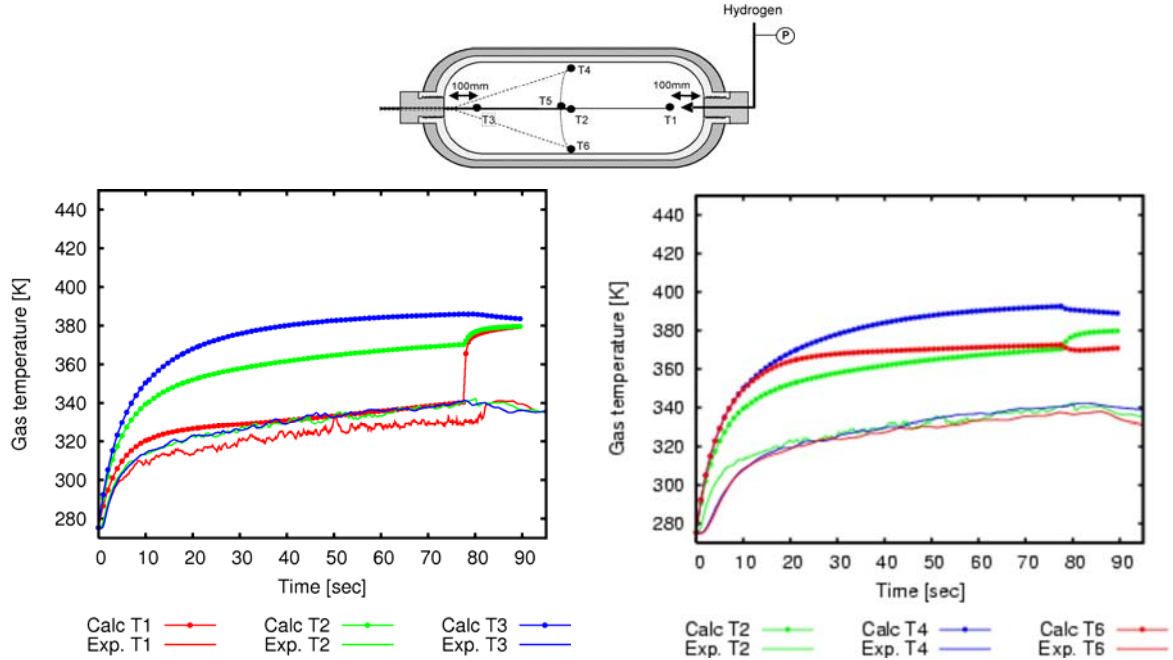
<解析手法>

本解析では有限体積法を用いた。ソルバーは FLUENT を用いた。計算の安定性、CFL 制約条件の緩和の理由から、基礎方程式の空間方向には陰的に離散化を行なう (陰解法)。また、移流項の離散化についても計算の安定性を最優先して一次精度風上差分を用いた。時間方向も計算の安定化の目的で、1 次の陰解法を採用した。このようにして得られた各離散化セルにおける物理量に関する連立一次方程式はブロック型 Gauss-Seidel 法を用いて解く。また、これに代数マルチグリッド法 (Algebraic Multi-Grid method、AMG) を組み合わせることで計算の高速化を図っている。乱流モデルには圧縮性流体解析で一般的に用いられる Spalart-Allmaras モデルを採用した。実在気体モデルとして、Modified Redlich & Kwong モデル⁶⁾をユーザー定義関数として導入した。容器壁面は non-slip 条件とした。

<結果>

イ. 断熱容器における温度挙動解析

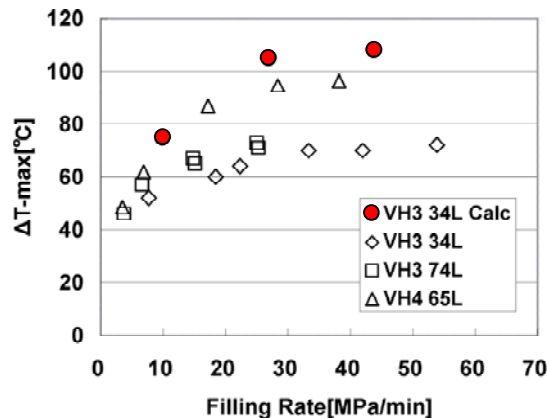
検証の結果、圧力上昇の挙動、充填終了時間については試験計測と良い一致をしたが、容器内温度分布については試験計測と定性的に一致した。



温度の時間履歴

ロ. 充填速度の影響

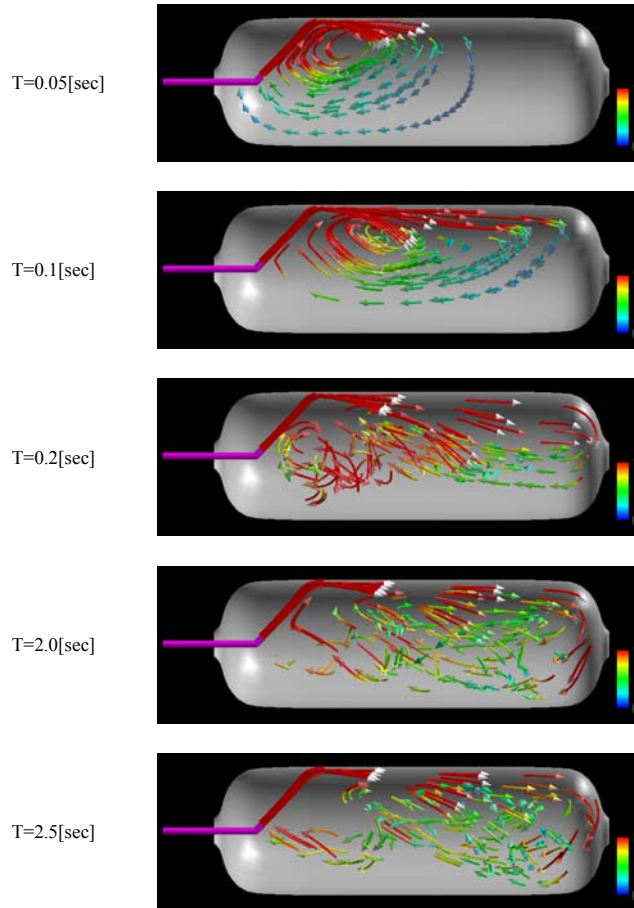
充填速度（流量）をこれまでの 500 [g/min]に加え、300、1100 [g/min]の解析を実施した。容器内ガスの温度上昇度 ΔT_{max} を充填速度で整理した結果、充填速度が増すと温度上昇度の傾きが穏やかになる特性については一致した。



容器内ガス温度上昇度 ΔT と充填速度の関係

ハ. 充填方向の影響

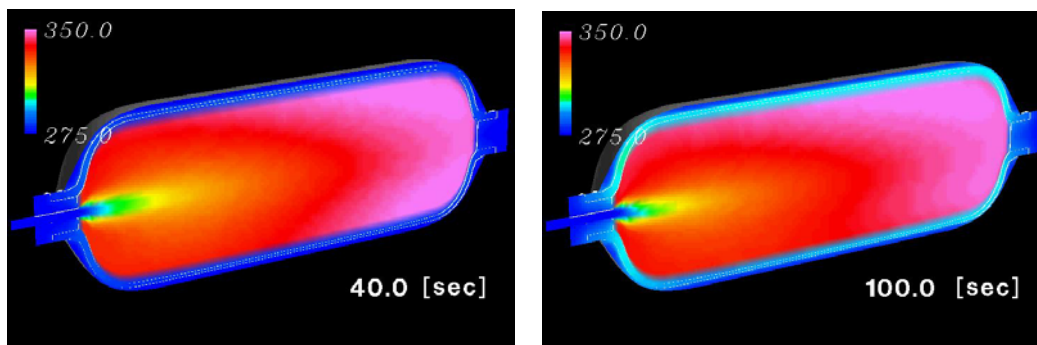
充填初期の流れの様子をみると、流れは上部壁面に衝突し、流れの方向が曲げられる。時間進行するに従い、タンクの奥まで流れは到達し次第に複雑な流れとなった。



流れの様子：パーティクル・シミュレーション

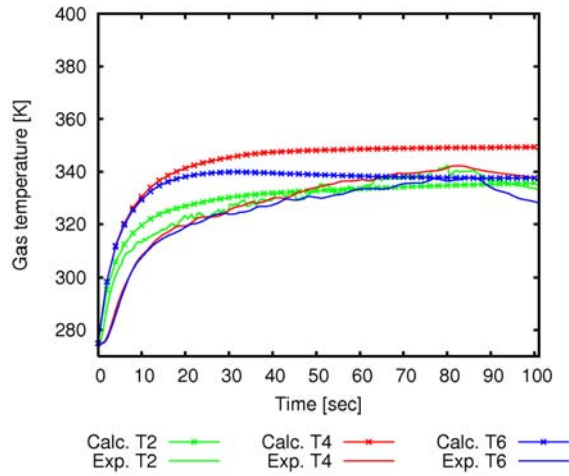
ニ. 周囲への熱伝達を考慮した温度挙動解析

解析結果の結果、充填ノズル近傍は流入ガスにより冷却されるため、エンド部の温度が高いこと。および鉛直方向に温度分布が生じた。



代表的な瞬時温度分布(全容器形状解析、VH3)

また、各位置での温度も実験に整合する結果が得られた。



容器内ガス温度の時間履歴

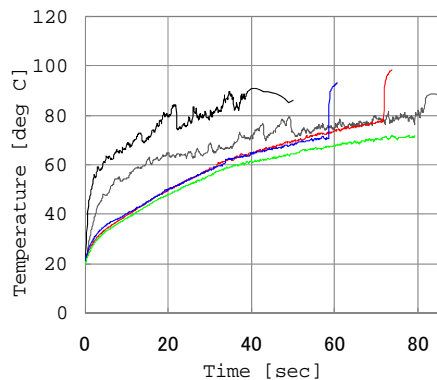
ホ) 実在気体モデルによる温度挙動解析

解析モデルに実在気体モデルを導入した。容器壁面には境界層を解像するための格子を貼り、格子セル数は約 104,000 個である。解析条件は実験条件と合わせるため、初期温度は 298.15 [K]、初期圧力は 2 [MPa] とした。水素の流入条件には一定の質量流量を与え、500 [g/min] の設定に関しては、実在気体モデルと理想気体モデルの解析を実施した。容器外表面 (CFRP 層) から外気への熱放出には、熱伝達係数 4.5 [W/m²K] を与え、外気温度は 298.15 [K] とした。

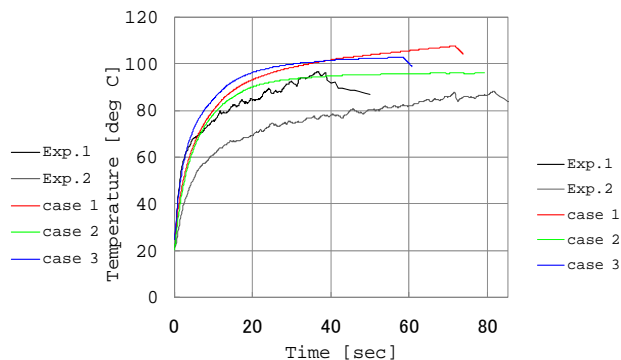
解析条件

ケース	状態方程式	充填の質量流量 [g/min]
1	real gas	500
2	ideal gas	500
3	ideal gas	750

この結果、実在気体モデルと理想気体モデルの結果には差異が現われ、実験値との比較では、タンク中央部の温度は一致傾向を示したが、タンク内の温度差はより大きくなった。



T1 における温度の時間変化



T3 における温度の時間変化

ii) 水素消費試験

<目的>

容器に充填された水素を消費した場合の容器および付属品等の温度特性などの基礎データを収集・解析するため、以下の調査を実施した。

- ii-①低温環境下における水素消費
- ii-②複数容器からなる燃料システムからの水素消費

ii-① 低温環境下における水素消費

使用状況における下限温度を調査するため、想定される最悪条件下である-40℃環境下において水素消費（放出）試験を実施し、容器各部の温度データの取得・解析を行った。

<方法>

試験容器

使用圧力	70[MPa]	
容器種類	VH3(Aluminum Liner)	VH4(Plastic Liner)
内容積	125[L]	40[L]
外径—全長	約 D600[mm]—L1000[mm]	約 D300[mm]—L900[mm]

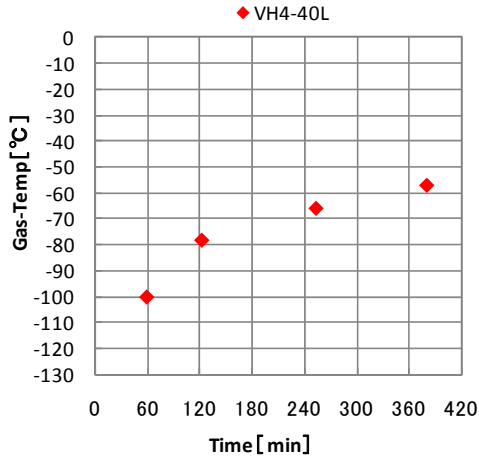
試験条件

充 填 量	70MPa @15℃相当量
環境温度	-40[℃]
容器初期温度	-40[℃]
容器初期圧力	約 56[MPa]
放出終了圧力	1[MPa]
放出時間	1、2、4、6[h]

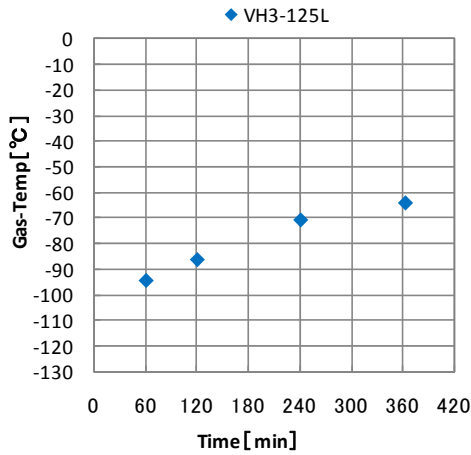
<結果>

試験の結果、放出時間が短いほど温度降下は大きくなることが確認され、最低到達温度は、VH4-40L 容器では-100[℃]、VH3-125L 容器では-94[℃]に達した。

水素ガス消費時には容器内ガス温度が低下するため、低温環境下（-40℃を想定）に静置された状態から水素ガスが消費される場合、容器設計確認試験温度である-40℃を大きく下回る温度に到達することが確認された。



a) VH4-40L 容器



b) VH3-125L 容器

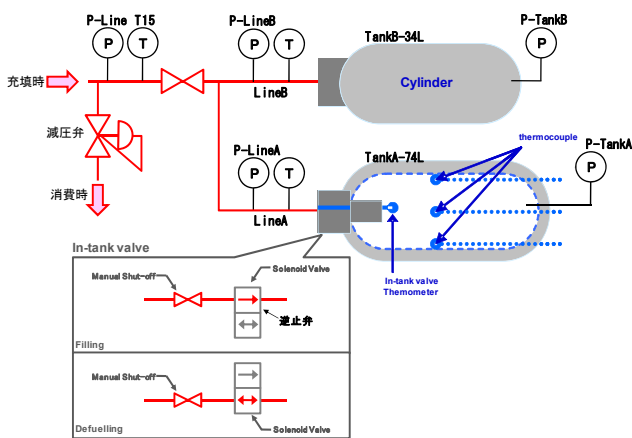
最低到達温度まとめ(T6:容器内下部ガス温度)

ii -② 複数容器からなる燃料システムからの水素消費

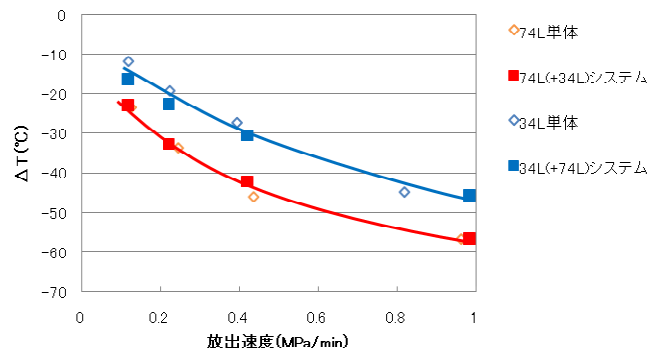
複数本の高圧水素容器および逆止弁、バルブ類がシステム化された状態で搭載された燃料システムからの消費試験を行い、それらの機器および機器の構成が及ぼす影響を調査するとともに、前述の容器単体消費試験データ使用にあたっての問題点の有無等の抽出を行った。

<方法>

車両に搭載される燃料システムは、以下に示すように、容器の本数・種類・容量、インタックバルブの構成(逆止弁、バルブ類、減圧弁有無)等により、種々の形状が想定される。その中で今回は、容量の異なる2本のVH3容器(74L、34L)および市販のインタックバルブにより燃料システムを構成した。消費試験時に使用する減圧弁は、容器個別ではなく、集合配管に1台設置した。試験は、燃料システムから水素を放出させ、容器内ガス温度および圧力を計測した。



燃料システムの構成



容器内中心温度降下度(ΔT2)と放出速度の関係

<結果>

燃料システムからの消費試験の結果、容器ごとのデータと容器単体での試験結果を比較すると、容器内ガス温度降下度はほぼ同じ傾向を示すことがわかった。また圧力挙動に関しても、燃料システムを構成する機器間における圧力差は無いことがわかった。したがって、消費試験に関しても、容器単体での試験データを有効に活用できることが確認された。

一方、容器により温度降下度が異なることが確認され、急速充填時同様、容器残圧がアンバランスになることが懸念される。

iii) その他

iii-① 極端温度圧力サイクル試験

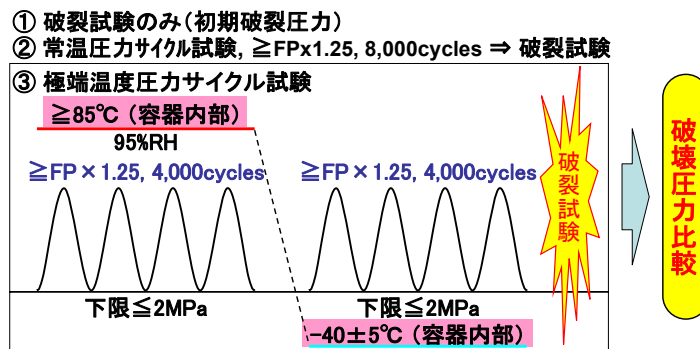
<目的>

使用限界温度(極端温度)での圧力サイクル試験が、容器寿命にどのような影響を及ぼすかといった事項に対する調査結果はほとんど公表されていない。

そこで本報告では、自動車用圧縮水素容器 (VH3、VH4) に極端温度圧力サイクル試験 (Extreme temperature pressure cycle test) を実施して、本試験が圧縮水素容器の容器寿命にどのような影響を与えるか調査することを目的とした。

<方法>

以下の3ケースの試料を作成し、各々破裂圧を調べて比較検討する。



極端温度圧力サイクル試験の試験条件

供試容器

容器種類・仕様	VH3容器 KHK別添9特認品	VH4容器 ANSI/IAS NGV2-1998品
最高充填圧力 [MPa]	35	35
内容積 [L]	39	65
外径×長さ [mm]	φ280×906	φ400×832
FRP種類	C-FRP	C-FRP (表面G-FRP)
ライナー材質	Al (A6061-T6)	高密度ポリエチレン(HDPE)
外観		

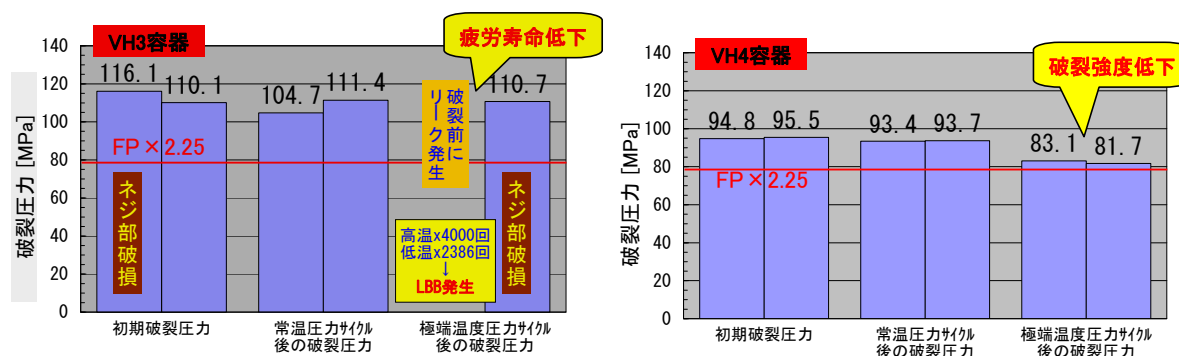
圧力サイクル試験条件

	極端温度圧力サイクル試験	常温圧力サイクル試験
試験の方式	非水槽式(大型恒温槽内)	非水槽式(ビット内)
充てん媒体	フッ素系熱媒体 (パーフルオロポリエーテル)	イオン交換水
試験条件	下限圧力	1.0MPa以下の圧力
	上限圧力	FP (35MPa) × 125% ≒ 44.0MPa以上
	加圧頻度	VH3 : 40 sec/cycle, VH4 : 50 sec/cycle
	加圧波形	サイン波
測定項目	加圧回数	85°C × 4000回 -40°C × 4000回
		RT × 8000回
測定項目	圧力, 歪み, 温度 (測定周期10Hz)	

*FP : Filling Pressure

<結果>

極端温度サイクル試験を実施し、使用温度が容器寿命に及ぼす影響を調査した結果、容器種類 (VH3、VH4) で比較すると、供試 VH3 容器の破裂強度への影響は小さいが、疲労寿命は低下する。しかし、供試 VH4 容器の場合では、疲労寿命は規定を満足するが、破裂強度は低下することが明らかになった。



極端温度圧力サイクル試験後容器の破裂圧

iii-② VH3 容器の疲労寿命に及ぼす環境温度の影響

<目的>

常温圧力サイクル試験では、環境温度や圧力媒体温度などが規定されていない。また、容器の疲労寿命は環境温度の影響を受けると考えられるが、その程度やメカニズムは解明されていない。そこで、自動車用圧縮水素容器 (VH3) の疲労寿命に及ぼす環境温度の影響を調査することを目的とし、環境温度を変えて、容器が疲労寿命を迎えるまで、圧力サイクル試験を行った。

<方法>

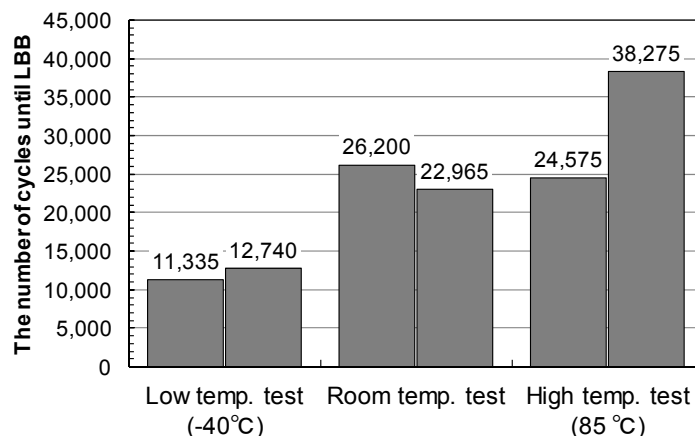
本試験では、VH3、35 MPa、34 L の圧縮水素容器を使用した。

各試験温度での試験方式および圧力サイクル試験条件

	低温試験	高温試験	常温試験
試験の方式	非水槽式 (大型恒温槽内)		非水槽式 (ピット内)
試験温度	-40°C	85°C	室温 (20~35°C)
試験湿度	-	95%	-
充填媒体	フッ素系熱媒体 (パーフルオロポリエーテル)		イオン交換水
上限圧力	44 MPa (Filling Pressure x 125%)		
下限圧力	0MPa		
加圧頻度	15 sec/cycle		
加圧波形	サイン波		
加圧回数	Occurrence of Leak Before Break		

<結果>

環境温度を変えて圧力サイクル試験を実施した。室温試験と比べて、低温試験では疲労寿命が約半分に低下した。一方、高温試験では疲労寿命のばらつきが大きく、一本は室温試験と同等、もう一本は室温試験より向上する結果が得られた。よって、VH3 容器の疲労寿命は、環境温度の影響を受けることが示唆された。



VH3 容器の疲労寿命に及ぼす環境温度の影響

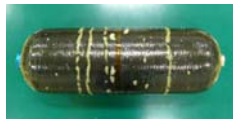
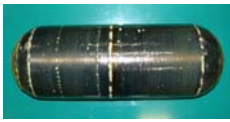
iii-③ VH4 容器の残存破裂圧力に及ぼす圧力サイクル試験温度の影響

<目的>

VH4 容器は極端温度圧力サイクル試験により残留破裂強度の低下が確認された。そこで、VH4 容器の極端温度圧力サイクル試験後の残留破裂圧力のサイクル数依存性を調査した。

<方法>

供試 VH4 容器概要

容器種類・仕様	VH4容器	VH4容器
最高充填圧力 [MPa]	35	70
内容積 [L]	40	40
外径×長さ [mm]	φ287×884	φ310×884
FRP種類	CFRP	CFRP
ライナー材質	PA(ポリアミド)	PA(ポリアミド)
外観		

圧力サイクル試験条件

		低温試験	高温試験	常温試験
試験の方式		非水槽式(大型恒温槽内)		非水槽式(ビット内)
充てん媒体		フッ素系熱媒体 (パーフルオロポリエーテル)	イオン交換水	
試験条件	上限圧力	FP (35MPa or 70MPa) × 125%		
	下限圧力	1.0MPa以下の圧力		
	加圧頻度	15 sec/cycle		
	加圧波形	サイン波		
	試験温度	-40°C	85°C	常温(推定:20~35°C)
	試験湿度	-	95%	-
	加圧回数	4000回, 11250回, 22500回予定 (常温圧力サイクル試験後の残留破裂強度調査結果で調整)		
測定項目	圧力, 歪み, 温度(測定周期10Hz)		圧力, 歪み(測定周期10Hz)	

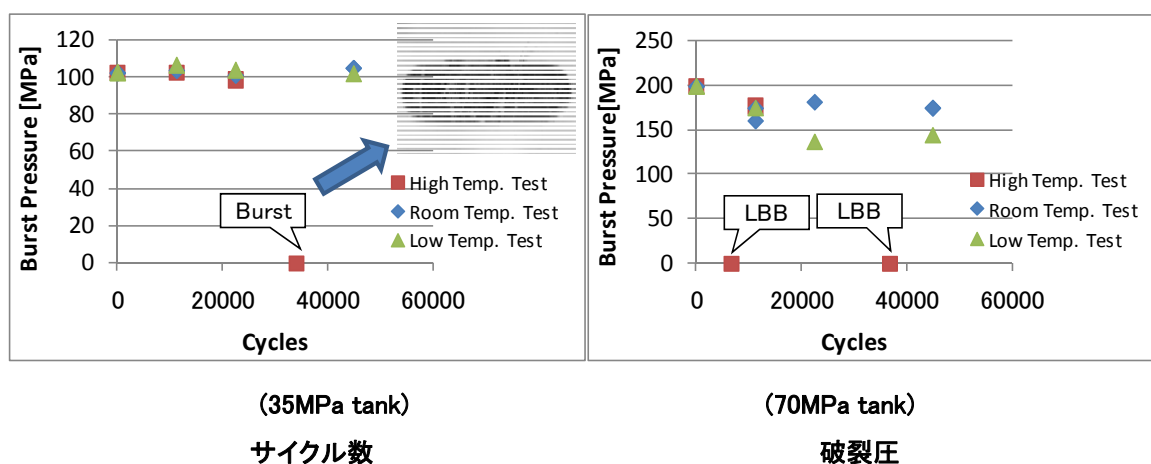
*FP: Filling Pressure

破裂試験条件

設定回数まで圧力サイクル試験を実施した後に、JARI S001 に準拠した破裂試験を実施し、圧力サイクル試験後の容器の残留破裂圧力を測定した。

<結果>

試験の結果、35MPa 供試 VH4 容器は、室温環境および低温環境にて 45、000 回の圧力サイクルを実施しても破裂強度はほとんど低下しなかったが、70MPa 供試 VH4 容器は、低温環境にて 20、000 回以上圧力サイクルを実施すると、30%程度の破裂強度が低下する傾向が見られた。また、35MPa および 70MPa 供試容器ともに、高温環境では容器破損の発生が早まる傾向が見られた。



C) シリーズ試験の導入検討と最高充填圧力試験の見直し

<目的>

車両上での容器寿命を評価する試験方法として、シリーズ試験が提案されている。シリーズ試験では、液圧サイクルかガスサイクルによる疲労試験が含まれる。また、項目の一つに VH4 容器（プラスチックライナー製複合容器）の水素ガス透過試験が含まれている。そこで、最適なシリーズ試験の検討のため、以下の4項目を調査した。

- (i) 液圧サイクル試験の妥当性検証
- (ii) ガスサイクル試験（充填放出サイクル時の温度変動挙動把握）
- (iii) ガス透過試験
- (iv) 新基準案における使用環境負荷試験

(i) 液圧サイクル試験の妥当性検証

<目的>

自動車用圧縮水素容器は、充填・消費の繰り返しによって疲労を受けるため、疲労寿命の評価は必須である。その方法として、液圧サイクル試験と水素ガスサイクル試験が挙げられる。液圧サイクルは数日で完了するが、水素ガスサイクルの場合、1サイクルあたり1~2時

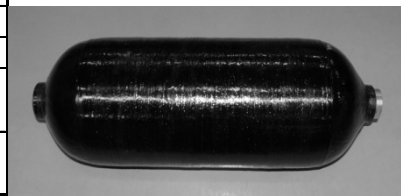
間必要で、試験完了まで数ヵ月を要する。このため、液圧サイクルで疲労寿命を評価することが望ましい。ただし、液圧サイクルでは容器温度が一定だが、水素ガスサイクルの場合は容器内ガス温度が圧力と同時に変化するため、容器温度が一定にならない。また、圧縮水素容器に一定質量の水素を充填する場合、温度によって充填圧力を変えなければならない。15°Cで35MPaとなる質量の水素を充填した場合をSOC (State of Charge) 100%充填とすると、-40°Cでは約28 MPa、85°Cでは約44 MPaのときSOC 100%になる。

容器の疲労寿命評価法を策定するためには、これらの違いを踏まえて、水素ガスサイクル試験を液圧サイクル試験に代替できるかどうか検討する必要がある。そこで、環境温度と圧力条件を変えることで、SOC 100%充填を想定した液圧サイクル試験を実施し、VH3 容器の疲労寿命に及ぼす影響を調査した。また、ライナー内面ひずみ計測によりライナー応力を調査し、環境温度と圧力が変化したときのライナー応力を把握した。

<方法>

供試容器

Specification	VH3 tank
Filling pressure	35 MPa
Volume	28 L
Diameter x Length	280 x 730 mm
Liner material, Coefficient of thermal expansion	Aluminum alloy (JIS A6061-T6), 24.3 ×10 ⁻⁶ /°C
Reinforcing material, Molding method, Coefficient of thermal expansion	CFRP, Filament winding, 0~1 ×10 ⁻⁶ /°C



圧力サイクル試験は、環境温度と上限圧力をパラメータとし、低温条件 (LT:-40°C、28 MPa)、室温条件 (RT:15°C、35 MPa) および高温条件 (HT:85°C、44 MPa) の SOC100%を想定した3条件と、JARI S 001 の常温圧力サイクル試験で規程されている条件 (NT: Normal temp. (15~35°C、温度制御なし)、44 MPa) について、各条件容器2本ずつ実施した。

サイクル試験条件

	LT	RT	HT	NT
Temperature	-40 °C	15 °C	85 °C	15°C~35 °C
Maximum pressure	28 MPa (FP×80%)	35 MPa (FP×100%)	44 MPa (FP×125%)	44 MPa (FP×125%)
Minimum pressure	0 MPa (FP×0%)			
Fluid (medium)	Perfluoro-polyether	Deionized water		
Frequency	15 sec/cycle			
Waveform	Sine curve			
Termination	Occurrence of leak before break			

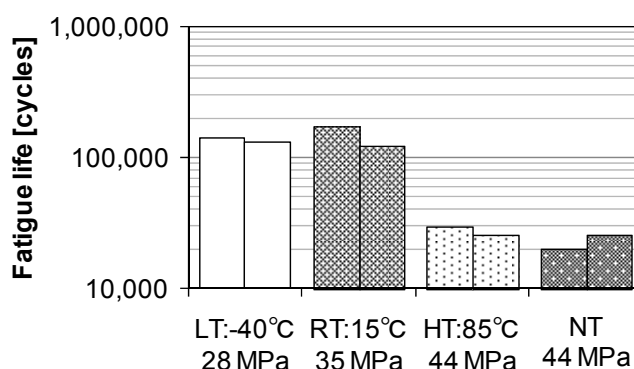
*FP : normal Filling Pressure = 35 MPa

VH3 容器に加わる応力には、残留応力、内圧による応力、熱応力がある。正確なライナー応力を把握するため、ライナー内表面にひずみゲージを貼付し、計測ケーブルを容器外に取り出す方法を用いて、ライナー内表面ひずみを直接計測した。

<結果>

SOC 100%充填を想定した液圧サイクル試験による疲労寿命

低温条件 (LT:-40°C、 28 MPa) と室温条件 (RT:15°C、 35 MPa) の寿命はほぼ等しく、長寿命であった。一方、高温条件 (HT:85°C、 44 MPa) は他よりも寿命が短かった。ただし、JARI S 001 の常温圧力サイクル試験で規程されている条件 (NT : Normal temp. (15~35°C、温度制御なし)、44 MPa) よりやや長寿命であった。 供試 VH3 容器の場合、常温圧力サイクル試験の条件 (NT、 44 MPa) は、今回実施したすべての SOC 100%条件よりも寿命に厳しく、常温圧力サイクル試験で SOC 100%想定 of 疲労寿命を担保可能であることがわかった。

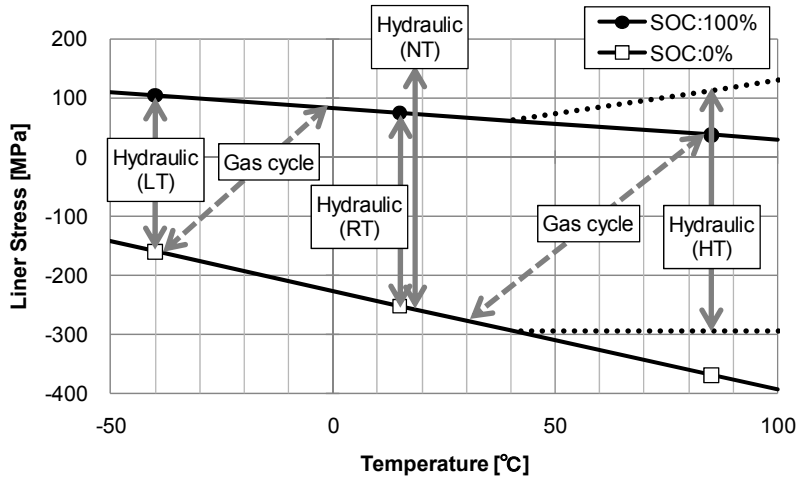


各種条件での疲労寿命

以上の残留応力、内圧による応力、熱応力の測定結果から、SOC100%時の温度と圧力の関係を総合して、SOC0%と SOC100%時の VH3 容器のライナー応力と温度の関係にまとめた。

高温環境の液圧試験では、残留応力による圧縮応力に加えて、熱応力による圧縮応力が負荷され、ライナーが圧縮側で塑性変形するため、応力範囲が引張側にシフトすることがわかった。また、常温圧力サイクル試験 (NT) の応力は、どの SOC100%条件よりも引張応力が大きく、応力範囲も大きい。よって、常温圧力サイクル試験は SOC100%条件より厳しい試験であると考えられる。

液圧サイクルは温度があまり変化しないが、ガスサイクルの場合、圧力上昇時に温度が上昇し、圧力低下時に温度が低下する。このため、ガスサイクルの応力範囲は、液圧サイクルよりも熱応力分小さくなることがわかった。よって、ライナーの応力範囲を比較すると、ガスサイクルよりも液圧サイクルの方がより厳しい試験となると考えられる。なお、国内基準では疲労寿命評価に液圧サイクル試験が採用されており、その妥当性を示す結果となっている。



SOC0%と SOC100%時の VH3 容器のライナー応力と温度の関係

(ii) ガスサイクル試験（充填放出サイクル時の温度変動挙動把握）

<目的>

水素ガスの充填・放出を単発で行う場合と比べ、連続で繰り返す場合における容器内ガスの到達温度の挙動についてガスサイクル試験により調査した。

<方法>

本試験では 70MPa 自動車用圧縮水素容器である VH3 容器（内容積 120L）および VH4 容器（内容積 40L）を使用した。容器内ガス温度および容器表面温度を測定するために T 型シース熱電対を設置した。容器内ガスの代表温度は、ガス放出時に最も温度変化が大きい容器内下部温度（T6）とした。充填ガス温度は、実使用環境を想定して設定した容器の環境温度に等しい場合と温度コントロールした場合の計 6 条件を設定した。試験のスタート条件は充填からスタートまたは放出からスタートの 2 通りを行い、放出時は 1 時間および 2 時間で容器内の減圧速度が各々一定になるよう流量を調整した。一方、充填時は VH3 および VH4 容器で同じ昇圧速度とし、VH4 容器内ガス温度が 85°C を超えない速度、または設備最大流量（VH3 容器において 16MPa/min）で行った。

試験条件一覧

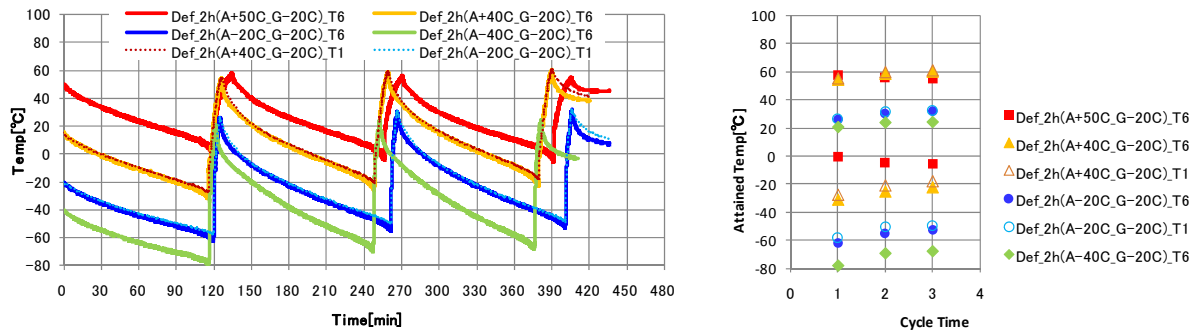
	温度条件[°C]		試験スタート時の 容器内初期圧力[MPa]		放出速度 [MPa/min]	充填速度 [MPa/min]
	環境温度	充填ガス 温度	放出 スタート	充填 スタート		
i	15	15	56.3	1.0	0.58 (2 h 放出時) または 1.16 (1 h 放出時)	7.0
ii	25	25	58.3	1.0		7.0
iii	50	-20	63.2	1.0		5.0
iv	40	-20	61.2	1.0		12.0
v	-20	-20	49.5	1.0		16.0
vi	-40	-20	45.6	1.0		16.0

<結果>

ii-① 環境温度および充填ガス温度の影響

充填・放出サイクルを繰返すと、2 サイクル以降の恒温側および低温側への到達温度の変化は、環境温度および充填ガス温度条件に因らず安定する傾向を示した。また到達温度は、充填ガス温度が同一でも環境温度が高いほど高温側に推移するなど、環境温度などの条件によって異なる傾向を示した。

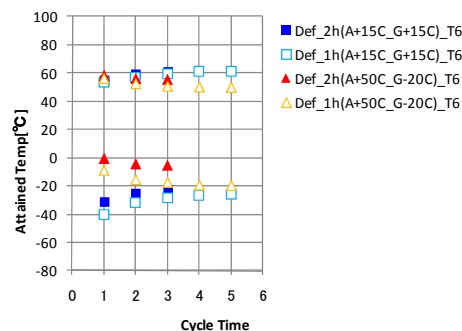
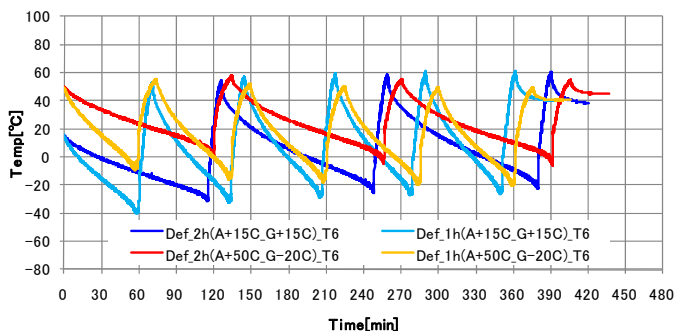
同一条件において、VH3 容器と VH4 容器の試験結果は、同様の温度挙動を示した。



各温度条件における容器内ガス温度(T6、T1)挙動および到達温度一覧(VH3)

ii-② 放出時間が変化した場合の影響

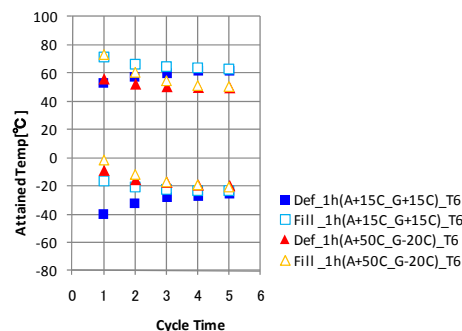
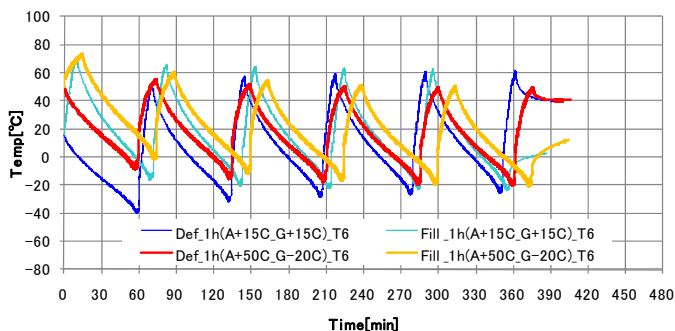
各サイクルにおける温度挙動は、放出時間を 1 時間に短縮しても、2 時間放出の場合と同様に 2 サイクルで到達温度が安定する傾向を示した。また VH3 容器と VH4 容器の試験結果は同様の傾向を示した。



放出時間を変化させた場合の容器内ガス温度(T6)挙動および到達温度一覧(VH3)

ii-③ 試験スタート条件を変化させた場合の影響

得られた結果を同一温度条件で比較すると、初期の到達温度に差が現われるが、数サイクル経過後にはほぼ同一温度となり、安定する傾向を示した。また VH3 容器と VH4 容器の試験結果は同様の傾向を示した。



スタート条件を変化させた場合の容器内ガス温度(T6)挙動および到達温度一覧(VH3)

実使用を想定した条件における容器内ガス温度は、条件により到達温度に違いが現れるが、その挙動は安定することが示された。このことは容器の安全性の面から、水素ステーションでの水素補給と走行を連続して行っても不安全な温度にならないなど、大変重要な知見であると考えられる。

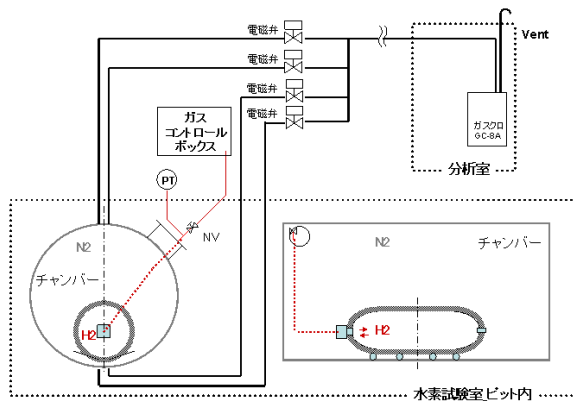
(iii) ガス透過試験

<目的>

ガス透過試験では、試験環境温度（15°C以上）が厳密に規定されていない。そこで、シリーズ試験および 70MPa への高圧化対応の取り組みとして、ガス透過試験の環境温度における依存性を調査した。

<方法>

ガス透過試験は、水素を試験圧力まで充填した圧縮水素容器を透過チャンバー内に設置して同チャンバー内の水素濃度をガス分析することにより行う。



ガス透過試験装置フロー図（左）および ガス透過試験装置外観写真（右）

ある経過時間の前後における透過チャンバー内の水素濃度の差から、ガス透過率 $\text{cm}^3/\text{hr}\cdot\text{L}$ を算出する。2点間の間隔は約 24hr から 72hr の間とする。

水素ガス透過率 Q ($\text{cm}^3/\text{hr}\cdot\text{L}$)

$$Q = \frac{\Delta(C_{H_2} V_c P_c / P_a)}{\Delta T \cdot V_t}$$

ここで C_{H_2} はチャンバー内水素濃度、 V_c はチャンバー内容積、 P_c はチャンバー内圧力、 P_a は大気圧力、 ΔT は経過時間、 V_t は VH4 容器内容積である。

2種類の VH4 容器を用いて環境温度 (15°C 、 20°C 、 40°C 、 85°C の 4 条件) と充填圧力 (35MPa 、 70MPa の 2 条件) をパラメータとしたガス透過試験を実施する。今回の試験ではガス透過率が一定値となるまでの時間を考慮し、試験時間を約 200~300hr とした。

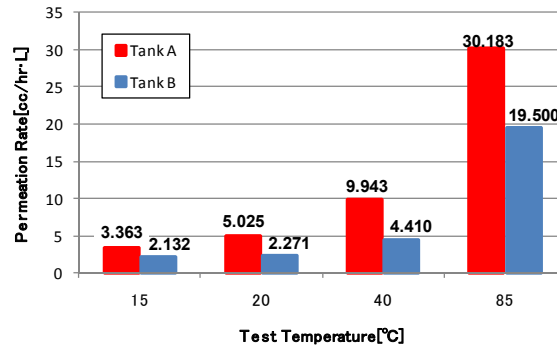
供試容器

	Tank A	Tank B
容器形状	VH4	
最高充填圧力 [MPa]	70	
内容積 [L]	31	40
外形寸法 [mm]	$\phi 356 \times 584$	$\phi 310 \times 884$
プラスチックライナー材質	HDPE	PA

<結果>

iii-① 環境温度の影響

Tank A、Tank B の各環境温度におけるガス透過率を比較した。Tank A、Tank B ともに環境温度が高温になるに従ってガス透過率も大きくなっている。本試験では、環境温度 15°C における Tank B のガス透過率約 $2.1\text{cm}^3/\text{hr}\cdot\text{L}$ が最小となったが、これは現規定量である $2.0\text{cm}^3/\text{hr}\cdot\text{L}$ を超える結果となった。

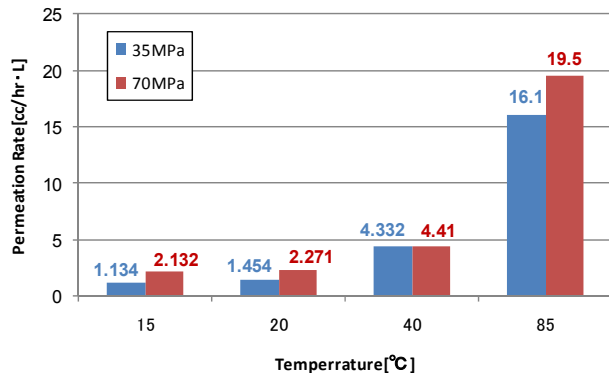
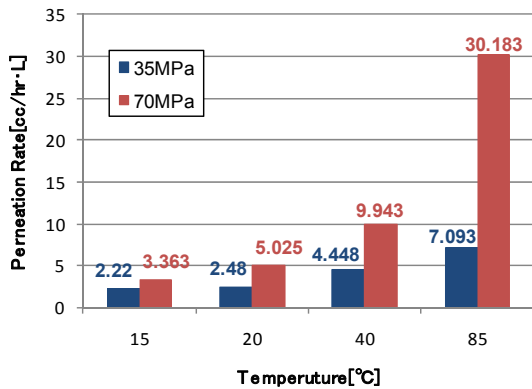


各環境温度試験時のガス透過率

iii-② 充填圧の影響

次に、容器への充填圧力がガス透過へ与える影響を確認するため、最高充填圧力の 50%の水素を充填した状態で透過率を確認した。

充填圧力と環境温度がガス透過率におよぼす影響を比較すると、Tank A、Tank Bともに環境温度に関わらず、充填圧力が高いほどガス透過率も大きくなっている。充填圧力比 (70MPa : 35MPa = 2 : 1) とガス透過率を比較してみると、Tank Aは圧力比以上に透過率に差が生じるケースがあるが、Tank Bでは圧力比ほど透過率に差は生じなかった。



各環境温度試験時のガス透過率(TankA) 各環境温度試験時のガス透過率(TankB)

iii-③ ガス透過係数の算出

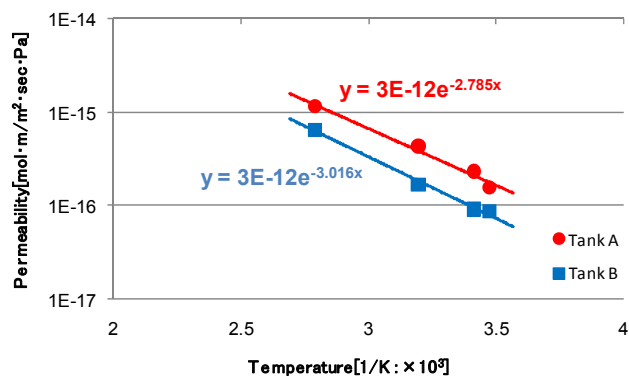
今回得られたガス透過試験データをもとに、VH4 容器への水素ガス透過現象についてガス透過係数を算出することを試みる。

ガス透過係数 P ($\text{mol}\cdot\text{m} / \text{m}_2\cdot\text{sec}\cdot\text{Pa}$)³⁾ は次式により算出する。

$$P = \frac{Q_m L}{\Delta p S t} \quad Q_m = \frac{V_{H_2} \rho}{M}$$

Q_m は透過量 (mol)、 L はプラスチックライナー厚さ、 Δp は VH4 容器内外の圧力差、 S は透過面積、 t は経過時間である。 Q_m は容器内から容器外へ透過した水素量 V_{H_2} 、密度 ρ および分子量 M から求めた。ガス透過係数のアレニウスプロットで表した結果、Tank A、Tank Bともにアレニウスプロットで直線性を示し、アレニウスプロットで温度影響を推測するこ

とができることが分かった。



透過係数のアレニウスプロット

(iv) 新基準案における使用環境負荷試験

<目的>

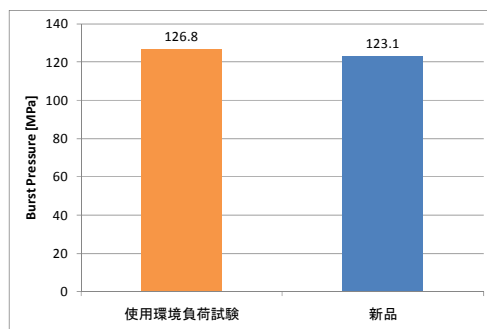
KHK/JAMA 新基準 (Step1) では、新たにシリーズ試験 (使用環境負荷試験) が提案されている。そこで、現行 JARI S001 を満たした容器を使用し、新基準で提案されている使用環境負荷試験を実施し、試験上の問題点の把握および現状容器の実力値把握を行った。

<方法>

現行 JARI S001 を満たした 35 MPa、28 L 容器を使用した。使用環境負荷試験は、「振り子式衝撃試験」「加速応力試験」「環境暴露試験」「破裂試験」を1つの容器に連続して行う試験である。

<結果>

35MPa-VH3 供試容器について、使用環境負荷試験を実施した。実施上の不具合は特に無かった。供試容器の場合、使用環境負荷試験後の破裂圧力は、新品容器と比べて劣化していなかった。



破裂圧力の比較

(D) その他

i) ガンファイヤ試験

<目的>

国際規格で規定されているガンファイヤ試験の国内での試験実施体制を整えるために、35MPa 加圧状態での貫通弾発射装置を用いたガンファイヤ試験について調査する。

<方法>

ガンファイヤ試験には貫通弾発射装置を使用した。



貫通弾発射装置本体と供試銃弾(FEDERAL LE308T1)

海外規格や海外機関と同等の水準で試験を実施するため、貫通力の高い30口径(7.62mm)の徹甲弾(FEDERAL LE308T1)を入手し試験を実施した。試験は旭化成ケミカルズ(株)あいはらの試験所の鉄板壁で覆われたケーシング内で実施した。銃弾発射の操作および各種計測は別室にて行った。試験は水素ガスを圧力35MPa充填した、容積約39LのType3容器(アルミニウムライナーCFRPフルラップ容器)2本を使用した。試験はISOドラフト等に規定されている圧縮水素容器の試験方法に準拠して実施した。

<結果>

試験前容器内水素圧力は34.2MPaであった。銃弾発射後、容器は破裂せず両側壁に貫通孔が開くと同時に水素ガスが放出され、2秒以内に容器内圧力は0MPaとなった。

今回実施したガンファイヤ試験は、圧縮水素容器のISOドラフト等のガンファイヤ試験法に準拠した、日本国内で初の試験であった。試験を実施した旭化成ケミカルズ(株)の協力のもと、容器の破裂リスクを出来るだけ抑える様々な安全対策を施し試験を行うことにより、安全にガンファイヤ試験を実施する上で重要な事項を把握することが出来た。

ii) 静電気帯電試験

<目的>

本研究では、①VH4容器の静電気特性、②CNGおよび水素ガスのガス放出時の容器帯電調査を行い、既存するVH4容器の静電気特性を把握するとともに、ガス種が異なることによつて帯電量が異なるのかを調査した。

ii-① VH4 容器の静電気特性調査

現在、市販されているある VH4 容器の静電気に関わる電気的な特性を把握するため、VH4 容器の表面抵抗測定、および帯電試験を行った。

表面抵抗測定

<方法>

供試 VH4 容器（35MPa、容積 65 リットル、高密度ポリエチレン製樹脂ライナー）の各部の導電性の有無を把握するため、以下の三箇所での表面抵抗を測定した。

- ・プラスチックライナー（40cm 間）
- ・CFRP（炭素繊維強化プラスチック、40cm 間）
- ・容器両端のエンドボス間（80cm 間、未充填）

<結果>

樹脂ライナーの表面抵抗は 10kV の印可電圧で $15.5G\Omega$ となり、極めて抵抗が高い。CFRP 層は炭素繊維の方向に沿って測定すれば導電性を有するが、繊維に対して垂直な方向（容器の肉厚方向）で測定すると、測定箇所や測定クランプの接触圧力によって大きく測定値が変動するため、定まった抵抗値を得ることができない。一方、容器両端のエンドボス間では、印可電圧 250V 以上であれば CFRP 層を介して導電性を有した。

帯電試験（容器カットモデル）

<方法>

ライナーの内面（充填ガスとライナーが接触する面）が何らかの理由で帯電したと仮定し、容器の接地状態によってどのように帯電電圧が変化するかを把握するため、以下の 3 ケースについて試験を実施した。

試験#1：非接地の状態をライナーを帯電させ、その後にエンドボスを接地した場合

試験#2：エンドボス部を接地した状態で、ライナーを帯電させた場合

試験#3：非接地の状態をライナーを帯電させ、放置した場合

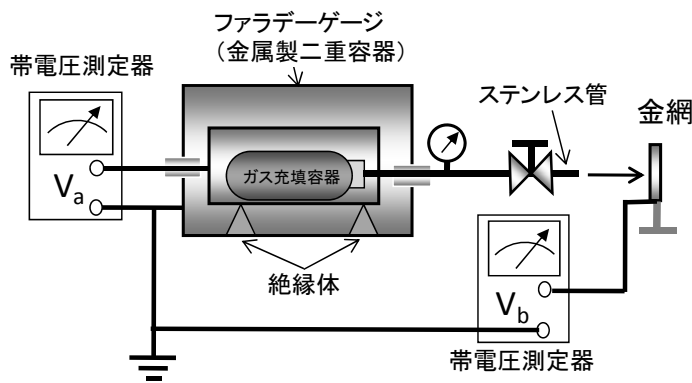
<結果>

ライナー内側面を帯電させると、非接地状態では次第に帯電した。しかし、エンドボスを接地すれば、直ちに帯電電圧は減少した。エンドボスを接地した際に、ライナーとエンドプラグ間での放電による発光や損傷の有無を調べたが、それらは確認できなかった。

非接地状態での帯電状況を比較すると、ライナーは極めて帯電しにくくなり、かつ、帯電終了後も緩やかに除電した。非接地状態であっても、帯電停止後は自然に除電した。しかし、その減衰は緩やかであり、200 秒後において $-5kV$ を保持した。また、350 秒後、エンドプラグ部にて接地させると、電位が急激に下がった。このことから、仮に非接地状態でライナーが帯電しても、時間経過とともに帯電は除去されると推定される。

ii-② 充填ガスの違いによるガス放出時の容器帯電
 <方法>

供試容器は、最高充填圧 70MPa の VH4 容器（容積 31L、ライナ材質：高密度ポリエチレン製）である。この容器に水素ガスあるいは CNG（メタン 99.5%）を充填し、ガスを放出させた際の帯電電圧を測定した。



実験方法

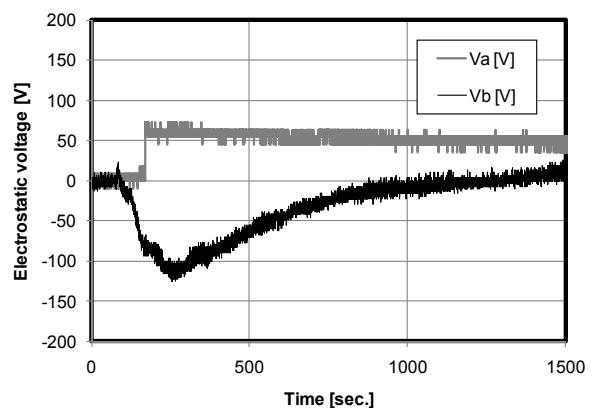
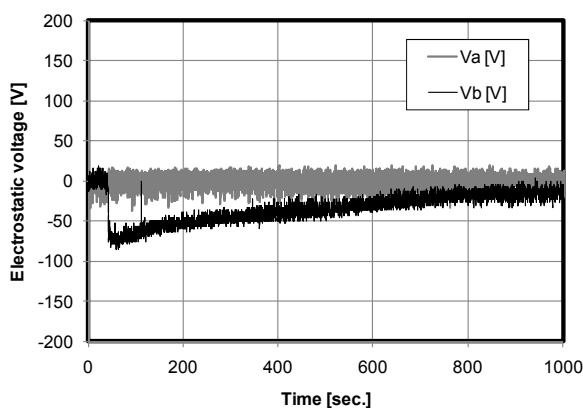


実験状況写真

VH4 容器は、ファラデーゲージ内に納めた。水素および CNG の大気中への放出流量は、それぞれの満充填環境下から同一時間で容器内の燃料を消費した場合を想定し、水素では 268NL/min 約 20 分（満充填 70MPa で 45 分相当の放出）、CNG では 120NL/min 約 20 分（満充填 20MPa で 45 分相当の放出）とした。この時の容器と放出部を含めた全体系での帯電電圧 V_a と、放出部 10cm 位置においてステンレス金網による捕集した噴出ガス周囲の帯電電圧 V_b を測定した。なお、測定系を含めた容器とアース間の静電容量は、0.355nF である。また、CNG の成分はメタンガス 99.5% の純度（残り 0.5% は窒素）のものを使用した。

<結果>

水素の放出時において、容器全体系の帯電電圧 V_a は、ほとんど生じなかった。一方、同じ容器を用いても CNG 放出時においては、容器全体系は+側に帯電した。よって、水素と CNG の帯電電圧を比較すると、CNG の方が高く、帯電しやすい結果となった。



水素を放出させた際の帯電電圧 CNG を放出させた際の帯電電圧

イ.圧縮水素自動車燃料装置用容器の安全性実証試験

国内容器メーカーの開発容器の安全性実証試験を行い、新基準緩和検討のデータに活用するとともに、国内メーカーの自動車用圧縮水素容器の開発を促進させた。

ウ.水素容器搭載車両の安全性評価

(A)水素漏れ許容量の安全確認に関する調査

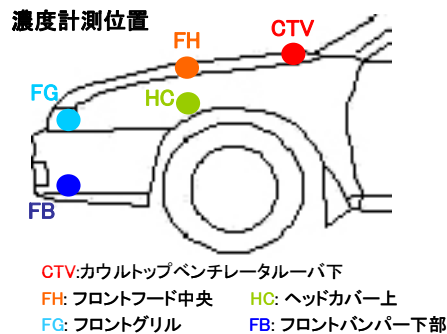
<目的>

我が国の水素燃料自動車の衝突時の燃料漏れ許容量は、ガソリン車のそれと等価発熱量となる 131 NL/min で規定される。この燃料漏れ許容量に十分な安全が確保されているかを検証するために、以下の試験を行った。

- i) 車体形状の違いによる水素濃度計測
- ii) 燃料漏れ許容量を超えた（最大 1000 NL/min）場合の水素濃度計測
- iii) 燃料漏れ許容量を超えた（最大 1000 NL/min）場合の引火試験

<実験方法>

水素はマスフローコントローラを用いて流量制御し、車幅方向中心線上のホイールベース中央下およびフロントサスペンションメンバ下（以下、それぞれを WB、SM という）から、直径 4、1、0.7 mm のノズルを用いて上方向に 600 秒間漏えいさせ、フロントコンパートメント内に進入する水素濃度を計測した。フロントコンパートメント内の濃度は、熱伝導式水素濃度計および接触燃焼式水素濃度計を用いて、サンプリング周期 100 ms で計測した。また、引火時の車両周囲の温度は、熱電対（K 形、0.5 mm）を用いて計測した。



水素濃度計測位置

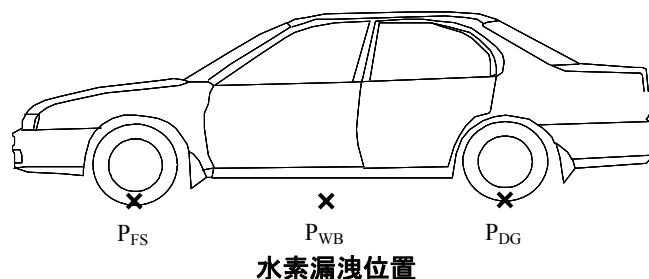
- i) 車体形状の違いによる水素濃度計測

FF 車および FR 車の計 2 台を調査した。



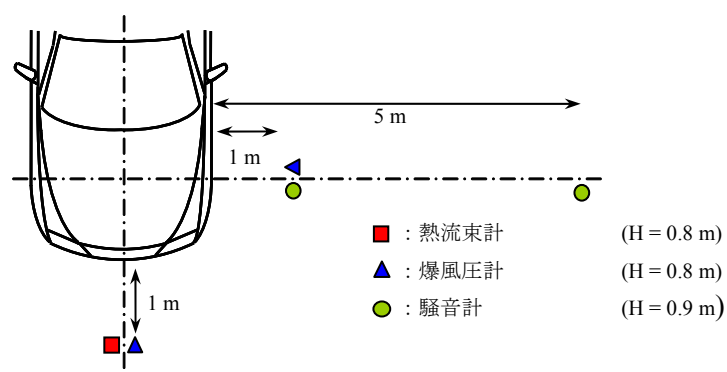
ii) 燃料漏れ許容量を超えた（最大 1000 NL/min）場合の水素濃度計測

試験は、供試車両に B 車（FR 車-セダントタイプの乗用車）を用いて実施した。水素の漏洩箇所は、車幅方向中心線上のホイールベース中央下およびフロントサスペンションメンバ下、ディファレンシャルギア下（以下、それぞれを P_{WB} 、 P_{FS} 、 P_{DG} という）の 3 水準とした。



iii) 燃料漏れ許容量を超えた（最大 1000 NL/min）場合の引火試験

濃度分布と逸散状況を確認した後に、最もエンジンコンパートメント内の定常濃度が高くなる条件（漏洩位置： P_{WB} 、漏洩方向：上向き）に関して引火試験を実施した。水素漏洩時間は 600 秒とし、点火は、エンジンコンパートメント内フード中央 10 mm 下方に設置したスパーク源により、水素の漏洩を停止した直後に行なった。引火時の周囲へ及ぼす影響を評価するため、周囲圧力、熱流束、音圧レベルを計測した。

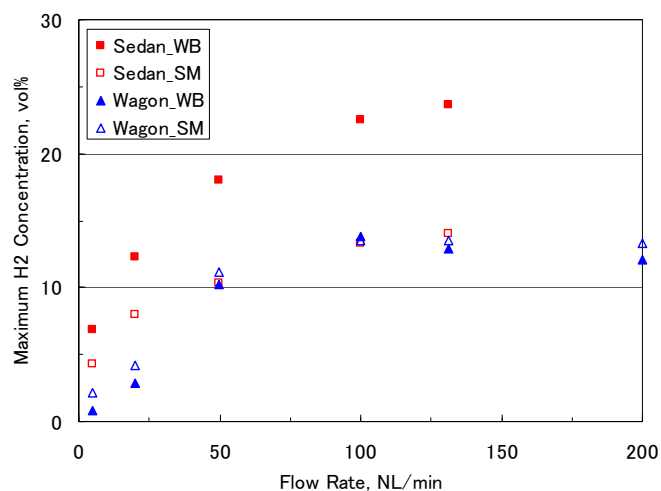


車両周囲の計測系設置位置（図中の H は地上高を示す）

<結果>

i) 車体形状の違い (FF 車および FR 車)

- 1) 車体形状が異なっても、フロントコンパートメント内の水素濃度は定常になる。
- 2) 車底部にプロペラシャフトトンネルがあり、大きな窪みを有している FR 車 (B 車) の方が、フロントコンパートメント内の水素濃度は高くなる。
- 3) 同一のノズル径の場合、流量が大きいほど濃度が高くなる。
- 4) フロントコンパートメントの形状が異なる 2 種類の供試車両の水素の逸散時間は大差なく、同程度の水素逸散性能を有している。



車種による最高濃度の比較(ノズル径 4mm の場合)

ii) 燃料漏れ許容量を超えた (最大 1000 NL/min) 場合の水素濃度計測

ii-① 水素をエンジンフード中央下から下向き (地面に向かって) へ放出させた場合

- 1) エンジンコンパートメント内の上部空間の濃度差は小さい。
- 2) 流量が大きくなれば、定常濃度も高くなる。
- 3) FB 位置では、水素濃度が上昇し、1000 NL/min では最小可燃範囲内になり、エンジンコンパートメント内の広範囲で可燃混合気が形成される。

ii-② 水素を車両後方から下向き (地面に向かって) へ放出させた場合

- 1) 全流量域で定常濃度は低い。

ii-③ 水素を車両底面中央から下向き (地面に向かって) へ放出させた場合

- 1) 全流量域でエンジンコンパートメント内上部空間に濃度差が生じやすい。
- 2) 同位置の上向きへ漏洩させた場合と比較すると、全計測点の定常濃度が低い。
- 3) 必ずしも、流量が大きくなれば、定常濃度は高くない。

ii-④ 車底部を平坦に加工した場合

- 1) 全流量域で、平面加工していない場合よりも定常濃度が低い
- 2) 200~400NL/min の範囲における定常濃度の低下は起こらない
- 3) 流量の大きい範囲では、流量を増しても定常濃度は変わらない

ii-⑤ 車両中央部から上方向に放出

- 1) 漏れ流量が小さいと、エンジンコンパートメント内の上部に位置する空間の水素濃度

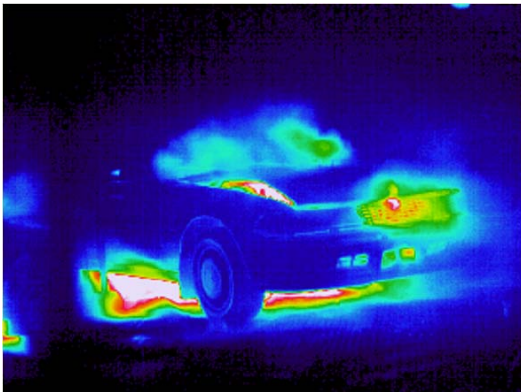
は不均一でなるが、流量が大きくなると、均一になる。

2) 同位置から下向きに漏洩させた場合よりも定常濃度が高くなる。

iii) 燃料漏れ許容量を超えた (最大 1000 NL/min) 場合の引火試験

1) エンジンコンパートメント内の最高温度は、流量によらず 300°C 程度となったが、プラスチック部品等に溶融はみられなかった。

2) 最大の熱流束は 14.2 kW/m²、車両周囲 (車両側方および前方 1 m) の圧力上昇は車両側方で 1.5 kPa、前方で 1.1 kPa の圧力上昇を記録した。これらの値は、人体への重大な影響を及ぼさない程度であった。ただし、引火後の車両の破損はフロントフードに変形がみられた。この結果、水素が 1000 NL/min 以下の流量で車底部から漏洩し引火に至っても、周囲の人には重大な影響を及ぼさなかった。以上のことから、圧縮水素燃料自動車の衝突燃料漏れ許容量 (131 NL/min) は十分な安全が確保されていることが明らかになった。



引火での火炎最大時における赤外線熱画像



引火後の車両の損傷程度

(B) 長尺容器および局所火炎暴露試験の検討

<目的>

近年、火災時においてCNG自動車の容器の破裂事故例があった。これらの原因は局所的に容器が炙られたことから、北米では、局所火炎暴露試験方法 (案) が提案された。

そこで本研究では、長尺容器の火炎暴露試験および北米で提案されている局所火炎暴露試験を検証するために、以下の試験を実施した。

- i) 長尺容器の火炎暴露試験
- ii) 局所火炎暴露試験の調査
- iii) SAE 提案の温度プロファイルの妥当性検証試験
- iv) 容器搭載箇所での温度把握のための車両火災試験

i) 長尺容器の局所火炎暴露試験

<方法>

試験条件は以下の2通りである。

実験条件

#	充填ガス	目標圧力	PRD シールド	容器	火源ガス流量
1	窒素	1MPa	装着なし	Type4、180L	300NL/min
2	CNG	20MPa	装着あり	↓	350NL/min

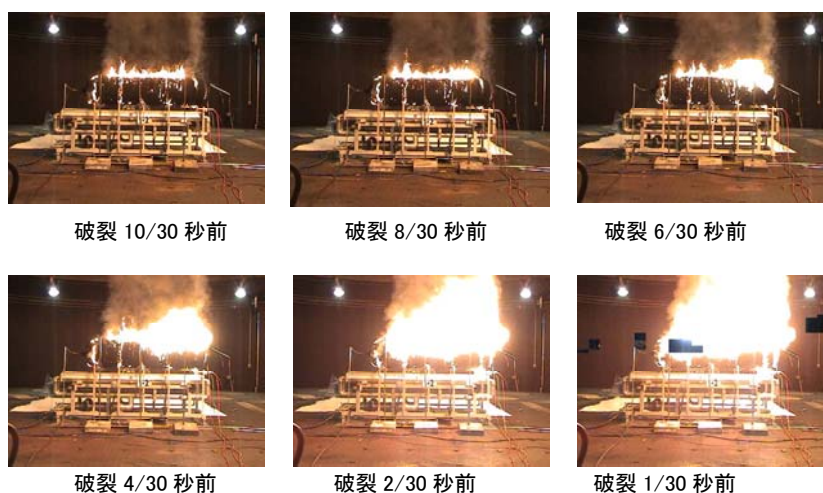
供試容器は、自動車用圧縮天然ガス容器 Type4、20MPa（容器容積 180L、406mm（外径） x 1、803mm（長さ） x 56kg（重量））を用いた。安全弁は作動温度 110℃±10℃を用い、複合バルブ（主止弁+安全弁）と安全弁（エンドボスに装着されるもの）の2種類を用いた。火源の端から安全弁までの距離は約 359mm である。安全弁のシールドは、試験#1-2 のみ装着し、厚さ 0.3mm のブリキ板を用いた。

<結果>

安全弁のシールドを装着しなかった場合（試験#1-1）、試験開始 387 秒後に安全弁が作動し、容器は破裂しなかった。しかし、シールドを装着させた場合（試験#1-2）、試験開始 385 秒（容器内圧 22.18MPa）に安全弁は作動しなかった。その後、火源の停止、およびガスを放出（1/4”配管）させたが容器は自己燃焼を続け、試験開始 440 秒に容器（残圧約 10MPa）は破裂した。以上のことから、

- 1) 容器の両端に安全弁が装着された長尺容器の容器中央部を局所火炎で暴露させた場合、安全弁が作動せずに、破裂に至ることがあること。
- 2) 安全弁の放出管径が小さい場合、放出時間が長くなり、破裂のリスクが高くなる。
ことが分かった。

今後、局所火炎や安全弁放出管のレイアウト（配管径の縮小）によって容器が破裂する可能性は十分あるため、システムレベル（容器周囲の遮熱物や複数容器のコンテナなど）での安全確認のためのさらなるデータの構築が必要である。



容器破裂前の連続写真

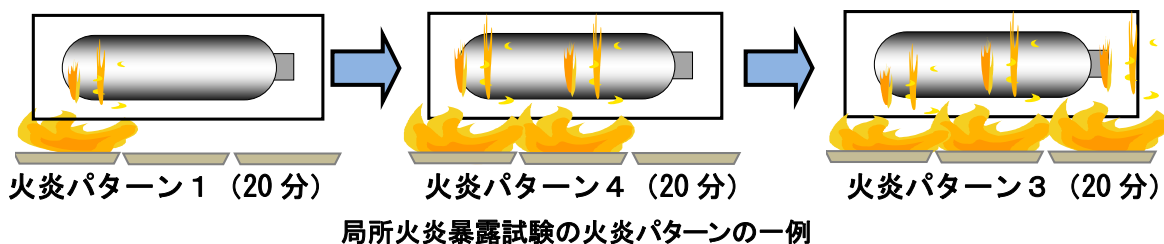
ii) 局所火炎暴露試験

<目的>

業界から提案された局所火炎暴露試験方法を行い、容器周囲の温度分布を把握する。

<実験方法>

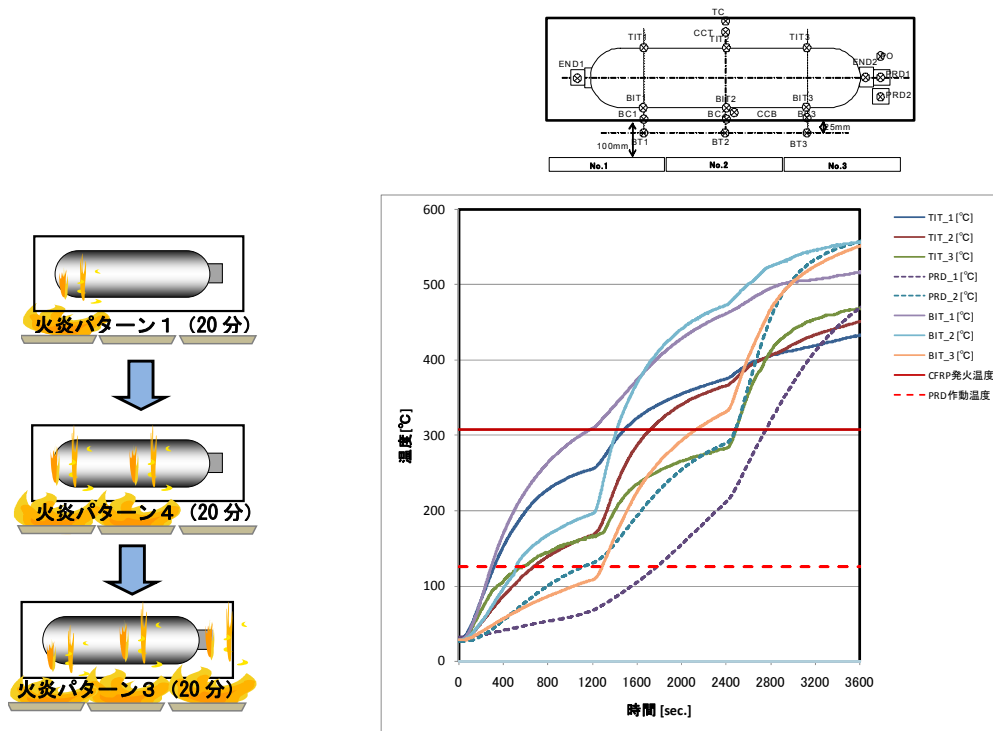
以下の図で示されるような様々な火炎パターンにより容器を火炎暴露させ、容器周囲の温度を測定した。



火炎パターンの可変は、3つのプロパンバーナの切り替えによって行う。容器長さ方向に対する各バーナの大きさは400mm、幅500mmとし、各バーナ間の移動によってバーナ長を1200～1650mmに変化することができる。各バーナの流量は、火源がケーシングを包み込んでいる状態になるように（流量：100NL/min）とした。

<結果>

試験結果の一例（容器表面温度と模擬安全弁の温度）を示す。



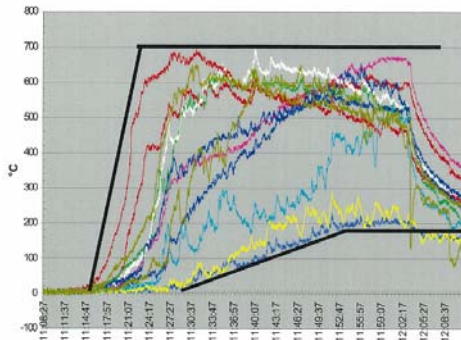
容器表面温度と模擬安全弁の温度（試験結果の一例）

提案された様々な火炎パターンのうち、PRD が作動するまでの間、容器表面温度が 300°C を上回る時間が最も長いものは、上記に示した火炎パターン（火炎パターン1→4→3）のケースであり、この試験が、最も容器に対して過酷な試験であると推定される。

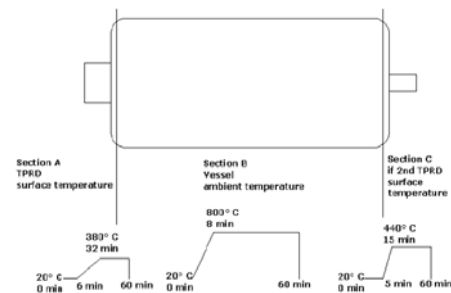
iii) SAE提案の温度プロファイルの妥当性検証試験

<目的>

北米で提案された局所火炎暴露試験の温度プロファイルを検証するため、各種類の車両火災試験を行い、容器が搭載される箇所相当位置での車両底部の温度を調べる。



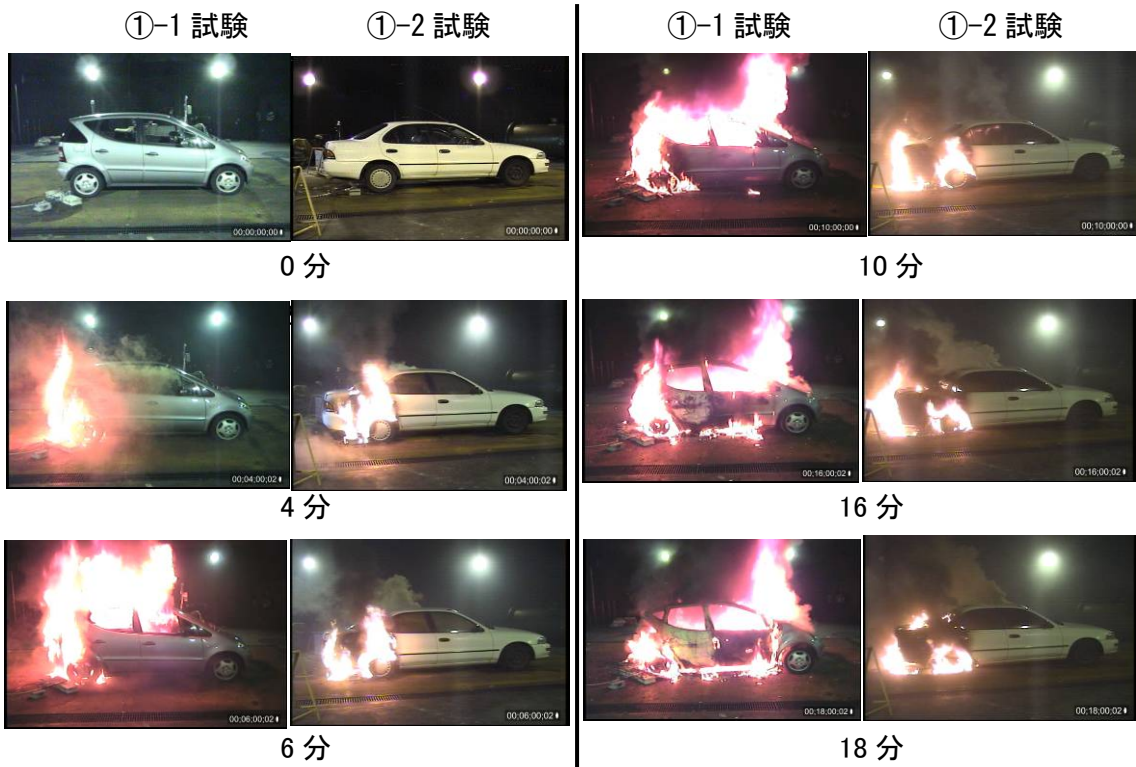
車両底部の温度データ(ガソリン車)



北米提案局所火炎暴露試験温度プロファイル

<試験方法>

火災試験の試験車両①-1 と 2 の延焼状況を示す。このような車両計 8 台のデータを用い、車両底部の温度を整理した。

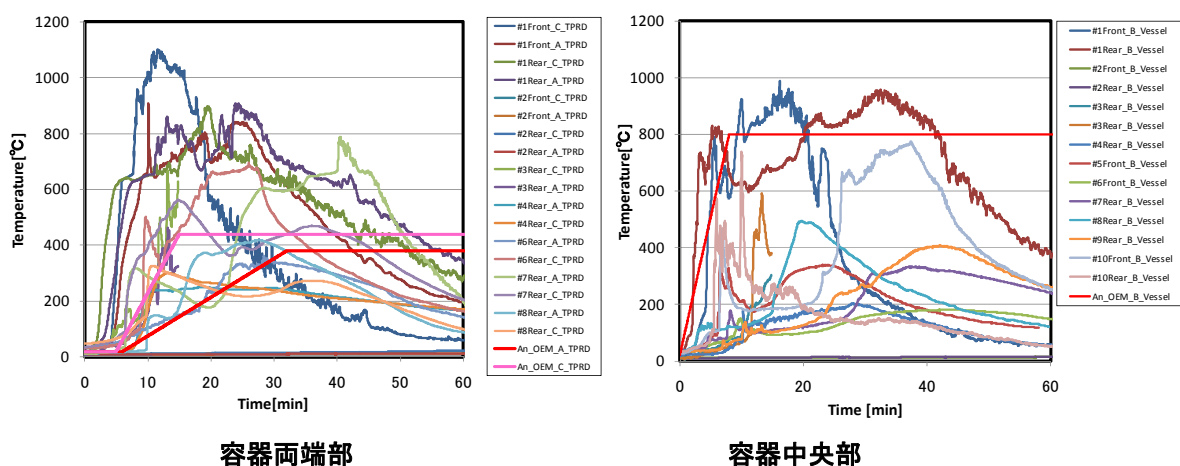


車両右側延焼状況比較

<結果>

SAE で提案されている温度-時間プロファイルの妥当性を検証するため、計8台の火災時における車両底部の温度分布を調べた結果、以下のことが分かった。

1. 車両および着火形態によって床下の温度プロファイルは大きく異なり、SAE で提案されている温度-時間プロファイルも代表的な温度プロファイルとは言い難い。
2. 車室内および後輪からの着火形態で、床下部の燃焼を助長するものとして共通しているのは、リアバンパーの燃焼（特に、熔融滴下燃焼）であった。
3. 水消火の直後、一時的に床下温度が上昇する場合がある。
4. 床下においては、110°C以上に到達しない箇所があった。この原因は、タイヤバーストとサスペンションの破損によって、ボディが落下し、車底部の部位によっては地面に近づく、あるいは接してしまっただため、火炎が進入できなかったためと推定される。
5. 安全弁の作動によるベントからの水素噴出火炎により、タンク周囲の温度が上昇した。そのため、複数容器を搭載した場合の床下の温度プロファイルを想定するには、安全弁の作動による水素放出の影響についても考慮する必要があると考える。



北米で提案された温度プロファイルと本試験データとの比較

iv) 容器搭載箇所での温度把握のための車両火災試験

<目的>

容器が片炙りされる時間を求めるために、容器および安全弁を搭載させた車両での火災試験を行う。

<試験方法>

試験条件

#	車両	出火箇所	窓開口	車両の姿勢	
#1	セダン	車室内	安全弁反対側	正常	
#2	↓	後部タイヤ	安全弁反対側	↓	
#3		後部タイヤ	全閉		
#4		リアバンパー	全開		車両横状態での直立姿勢
#5		1BOX	車室内		安全弁反対側
#6	↓	後部タイヤ	安全弁反対側	↓	



局所火炎暴露試験時間を算出するにあたり、以下の仮定をした。

- PRD の温度は 25mm 角金属ブロック（アルミニウム合金製）中心部の温度であり、容器の両端部位に相当する車両左右 2 箇所での計測点（PRD1、PRD2）を用いる。
- タンクの計測点は多数有るが、その中で最も早く 320 °C 以上に温度が到達し、かつその後、長時間 320 °C 以上を継続した計測箇所をタンクの温度とする。
- 片炙りされた状態とは、容器の一部が直接、炎によって接炎され、CFRP 自体が燃焼した状態になっている状態であると定義する。
- CFRP の発火温度は 320 °C @50kW/m²であったことから、容器表面が 320 °C に到達した時、CFRP 自体が燃焼しているため、この温度を片炙り開始温度と定義する。
- 一方、安全弁の作動については、安全弁近傍において 25mm 角金属ブロック（アルミニウム合金製）中心部の温度が平均 228 °C（141～356 °C）を超える、安全弁が作動していることから、228 °C に到達した時を安全弁の作動開始温度とする。

局所火炎暴露時間は以下の式で定義する。

$$\text{局所火炎暴露時間} = \text{容器が } 320 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ を超えた時} - \text{安全弁作動想定時間}$$

$$(\text{双方の安全弁の中で最も遅く } 228 \text{ }^{\circ}\text{C} \text{ に到達した時間})$$

ただし、安全弁作動前に容器温度が 320 °C 以下に下降してしまった場合、片炙り時間は安全弁が作動する前に容器温度が 320 °C 以上を継続した時間とする。

<結果>

以下の表に局所火炎暴露時間を示す。

局所火炎暴露時間

TEST No.	車両型式	出火位置	窓	容器箇所	局所火炎暴露時間
TEST#1	セダン	車室内	開	トランクルーム内容器	5分
				床下前側容器	1分
				床下後方容器	1分
TEST#2		後タイヤ	開	トランクルーム内容器	1.5分
				床下前側容器	—
				床下後方容器	2.5分
TEST#3	後タイヤ	閉	トランクルーム内容器	—	
			床下前側容器	—	
			床下後方容器	—	
TEST#4	後バンパ —	開	トランクルーム内容器	6分	
			床下前側容器	0分	
			床下後方容器	5分	
TEST#5	1Box	車室内	開	床下前側容器	5分
				床下後方容器	11分
TEST#6		後バンパ —	閉	床下前側容器	9.5分
				床下後方容器	0.5分

これらの結果、片炙り時間＝容器が 320℃ を超えた時—安全弁作動想定時間（双方の安全弁の中で最も遅く 228℃ に到達した時間）と定義すると、最大 11 分であること。および車両が同一であっても、容器搭載位置、出火位置、窓開口条件、車両の姿勢（ローラーバーなど）により、容器の温度のプロファイルは異なることが明らかになった。

(C)水素噴出火炎の周囲影響の調査

<目的>

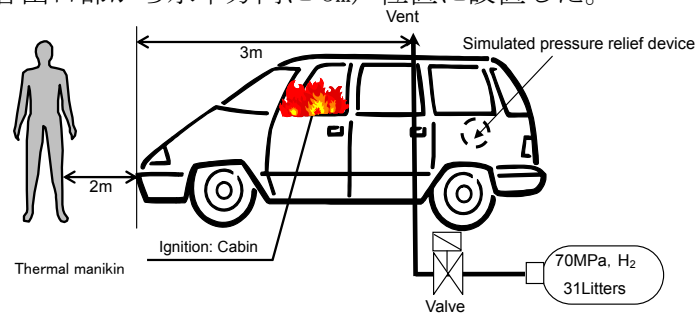
安全弁の作動時には、水素噴出火炎が形成されるため、消火救助などによる安全指針策定には、周囲の人への影響を調査する必要がある。そこで、サーマルマネキンによる水素噴出火炎の周囲影響を調査する。

<方法>

本実験では、マネキンに国内の消防署にて使用されている耐火服(メタアラミド 95%+パラアラミド 5%)、下着(綿 100%)、耐熱グローブ、靴(消防用ブーツ)、ヘルメットを着用させ、火傷傷害を評価した。

安全弁の作動による水素の放出は、以下の方法で行った。水素は、火炎に暴露されない位置に設置した水素容器(約 68MPa、容積 31L)から供給し、エア駆動弁により放出管から放出させる。放出のタイミングは、車室内の後方に設置した模擬安全弁(純アルミニウム A1100 製 25mm 角ブロック)の中心部温度が 110℃以上になった時点とした。放出管(内径 4mm)は車両中央部のルーフ上に固定し、その噴出方向は上方へ向けた。なお、放出配管ライン上で

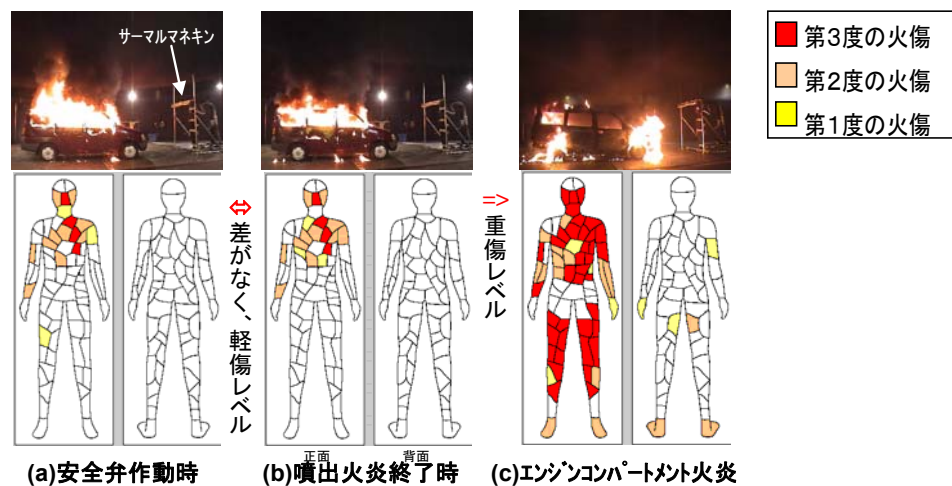
の最小絞り部の内径は直径 2.8mm である。車両は、ガソリンタンクを取り外したバン形状のガソリン自動車を用い、車室内のダッシュボード内に収納された灰皿内に設置した固形アルコール燃料によって着火させた。車両の窓ガラスは前席側の左右のみを開口させた。サーマルマネキンには、国内の消防署にて使用されている耐火服(メタアラミド 95%+パラアラミド 5%)、下着(綿 100%)、耐熱グローブ、靴(消防用ブーツ)、ヘルメットを着用させ、車両前方から 2m (放出管出口部から水平方向に 5m) 位置に設置した。



試験方法の概要

<結果>

水素噴出火炎形成時 (PRD 作動時) および噴出火炎が形成されていない安全弁作動後の 2 分間暴露の火傷分布を比較すると、傷害を負っている部位や火傷傷害もほとんど差がない。一方、マネキンから近距離位置にあるエンジンルームが火勢期である間においては、上半身と大腿部に大きな傷害が見られる。



サーマルマネキンによる水素火炎の周囲影響調査(車両前方 2m 位置)

これらの結果から、上方向へ水素噴出させた際での火傷被害は、従来の自動車火災と同等レベルであることなどが明らかになった。

(D) 消火・救助活動での安全情報調査

<目的>

安全弁作動時の噴流火炎への消防の対応として、California Fuel Cell Partnership の水素燃料電池自動車の緊急対応ガイドでは、水素噴流火炎が消炎すると爆発の恐れがあるので、噴流火炎のベント部に向けて放水すべきではないとされる。一方、一般の建造物などの火災では、火災熱による鋼製ガス容器の破裂を防ぐために、放水によって圧力容器を冷却する処置がとられる。しかし、近年、自動車で用いられている炭素繊維(CFRP)複合容器では、鋼製容器と同様の対応方法で良いのかの知見がない。

そこで、圧縮水素容器搭載自動車の消火・救助時に危惧される事象や問題点ならびにそれに対応する具体策を検討するための調査・研究のひとつとして、

- i) 水素噴流火炎の消炎の可能性
- ii) 放水の冷却による容器の強度や安全弁への影響を調査する。

i) 水素噴流火炎の消炎の可能性

<試験方法>

水素ガス容器(約 15MPa、47L)からのガスを、安全弁作動時のガス放出孔を模擬したベント管(直径 4.2mm)から大気中に噴出し、電気スパークによって着火する。形成された水素噴流火炎基部に向けて、水または粉末消火剤(自動車用 ABC 消火剤)を散布し、噴流火炎が消炎するかを試みる。水消火で使用した散水ノズルには最大放水量 500L/min・m²、呼び径 50A を使用した。試験は、模擬車両を製作し、その車両にベント管を取付け、アスファルト舗装路面を敷いた上で実施した。

ガスの噴出方向は上方、および斜め下方 45° の 2 通りとした。ベント管は上方に向けた場合、模擬車両のルーフ後部中央に、斜め下後方 45° に向けた場合、車両の後輪軸の床下に設置した。消炎の有無は、熱電対および赤外線熱画像装置によって判断した。

<試験結果>

計 8 ケースの消炎試験を行った結果、水素噴流火炎は、上方向に放出した場合、故意にベント孔へ向けて水または粉末消火器で消火を試みても、消炎することはなかった。斜め下 45° に向けた場合も容易に消炎しなかったが、一部、試験#4 ではベント部の噴出圧が 0.9MPa まで低下した際に消炎した。しかし、噴出圧 0.9MPa 程度の火炎長は 50cm 以下であり、かつ容積 50L 程度では、残り数十秒で残圧がゼロになる。また、試験#7、#8 においては、噴出圧がそれぞれ 0.3、0.2MPa になった際に火炎が消炎したが、加熱されたアスファルトによって数秒後に再着火した。しかし、本試験の場合では、開放空間での試験ケースであり、水素ガスが閉じ込められるような条件下にはならないので、再着火しても、爆発などの危害を及ぼすような事象は生じなかった。このことから、実際の車両における安全弁の作動時の水素噴流火炎は放水や粉末消火による消火を試みても容易に消炎せず、かつ噴出圧の小さい状態で消炎後に再着火しても、車両周囲の人に対して危害を加えることはないと考えられる。

ii) 消火放水による容器・安全弁への影響調査

< 試料作成および試験方法 >

火災で加熱された容器と安全弁が消火放水を受けた際の事象把握、および容器の強度に及ぼす影響を調査した。供試容器にはアルミライナー複合容器（VH3、最大充填圧 35MPa、容積 39L）を用い、以下の 6 つの条件で試料を作成した。

「試料#1」：安全弁（作動温度 $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ）を装着した容器に 35MPa の水素を充填し、横置きにした容器の底部からプロパンバーナ火炎で暴露する。安全弁の作動と同時にバーナを停止し、ただちに容器全体に放水した。

「試料#2」：水素を充填していない供試容器を、試料#1 と同一時間で火炎に曝し、その後、バーナを停止し、自然放置した。

「試料#3、4」：水素を充填していない供試容器を 5 分間火炎に曝す。試料#3 は放水による冷却、試料#4 は自然放置した。

「試料#5、6」：水素を充填していない供試容器を 8 分間火炎に曝す。試料#5 は放水による冷却、試料#6 は自然放置した。なお、本容器に 35MPa の水素を充填し、安全弁を装着せずに火炎暴露試験をした場合、416 秒（約 7 分）で破裂した。よって 8 分間の火炎暴露は、確実に容器が強度劣化している条件である。

また、上記の試料以外に、容器の強度劣化の指標のため、火炎暴露していない供試容器の耐圧も調べた。火炎暴露時には、容器周囲温度を把握するために、容器には計 14 点の熱電対を装着した。これらの各条件で作成した容器は、圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準 JARI S-001 に準じた水破裂試験によって、破裂圧力を調べた。

< 試験結果 >

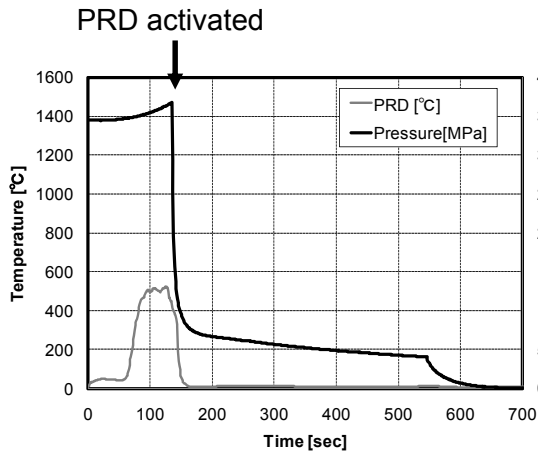
ii -① 容器の焼損状態

35MPa の水素を充填し、容器を火炎暴露させると、2 分 15 秒で安全弁が作動した。その後、直ちにバーナ火炎を消すと、水冷却および自然放置では容器自体は燃えずに、かつ容器自体の温度変化においても双方、大差なかった。

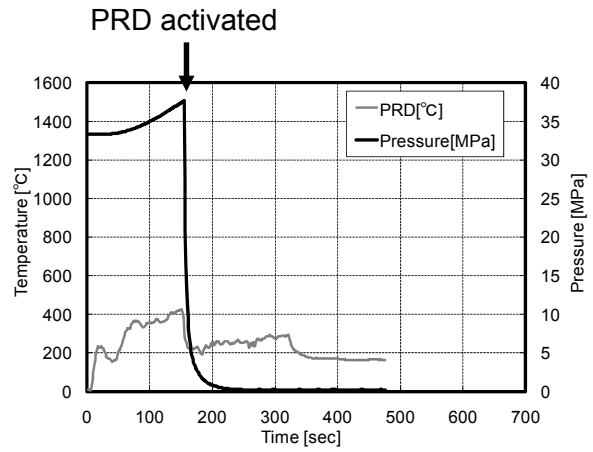
水で冷却すると、容器のほとんどの箇所は冷却されるが、放水していない自然冷却の場合、火源を停止しても容器自体が約 4 分間自己燃焼を継続し、容器が加熱され続けた。

ii-② 安全弁作動の状態

試験#1 の容器内圧と安全弁周囲温度を示す。



試験#1(PRD 作動後にただちに水で冷却)



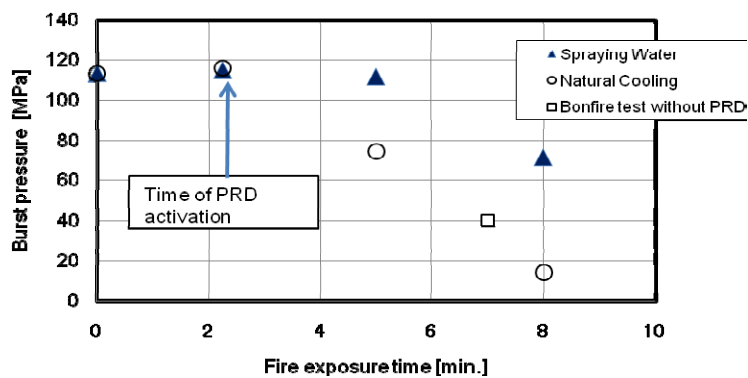
PRD 作動後にそのまま放置

容器の内圧と PRD 温度

安全弁作動時に容器全体を水で冷却すると、水素の放出時間は 4 分以上になった。そのため、試験の安全性を配慮し、別途、設けた緊急放出弁により、容器内のガスを強制放出させた。一方、安全弁が作動すると、水素ガスの放出は約 1 分で完了する。安全弁の作動時に水で冷却されたことにより水素の放出が遅延した理由は、融点の低い金属で構成された安全弁の溶栓が冷却によって再凝固し、水素を放出する流路を一部閉塞させたためと考えられる。なお、現在の規定では、安全弁の再閉塞に対して規制されていないが、再閉塞しない構造の安全弁は既に開発され、実際に使用されている。

ii-③ 火炎暴露試験後の水破壊試験の結果

火炎暴露時間と水破壊試験の破裂圧力の関係を示す。ここで、火炎暴露時間 0 分で示されている破裂圧は、本供試容器自体の耐圧 (110.3~116.2MPa) である。また、□の印は、安全弁を装着しない状態で 35MPa の水素ガスを充填した本供試容器の火炎暴露試験による破裂圧と破裂時の時間を示している。



火炎暴露時間と容器の破裂圧の関係

安全弁作動時まで火炎暴露を継続させた場合（火炎暴露時間：2分15秒）、水消火および自然放置した場合でも、容器の耐圧は供試容器自体の耐圧と同じであり、破裂強度は低下していない。5分間の火炎暴露では、自然放置させた場合のみ、耐圧が低くなった。さらに、8分間の火炎暴露では、両者ともに耐圧が小さくなったが、この場合も、水消火させた方が強度は高かった。

以上のことから、

- 1) 安全弁作動時の水素噴流火炎は、水消火および粉消火では容易に消炎しない。
- 2) 安全弁作動時に容器や安全弁へ直接消火放水すると、安全弁が閉塞することがある。
- 3) 自動車用の炭素繊維(CFRP)複合容器の強度は消火放水した方が保たれる。

よって、水による消火により再閉塞しない安全弁を車両が採用していれば、開放空間での噴流火炎の消炎による大きな爆発や、容器が強度的に劣化することはないと考える。

(E) 駐車場や船舶輸送に関わる課題

<目的>

水素燃料電池自動車が普及に至る過程では、事故や放火あるいは震災などにより、ガソリン車などの水素以外の燃料自動車とともに火災に至る可能性がある。このような燃料種の異なる自動車同士が混焼した場合の火災性状は、ほとんど報告されておらず、これらの把握は将来の駐車場やトンネルあるいはフェリーや車両運搬専用船などの船舶輸送の火災安全設計に必要である。これらの研究の第1歩として、

- i) ガソリン自動車と水素燃料自動車の混焼
- ii) 海上輸送を想定した複数台の水素燃料自動車火災試験

を行い、水素燃料自動車が存在した場合の隣接車両への着火や延焼性に及ぼす影響を調べる。

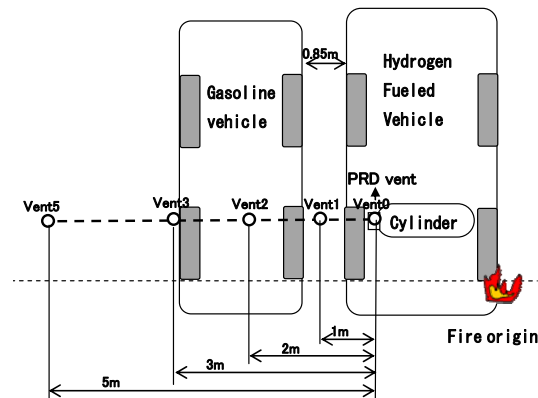
- i) ガソリン自動車と水素燃料自動車の混焼

<試験方法>

この試験では、シナリオを以下のように設定した。

- 1) 駐車場での放火を想定、2) 安全弁からの放出管側にガソリン車が駐車、3) ガソリン車と反対側の後輪タイヤ部位から出火、4) 窓はすべて全閉

このシナリオを想定し、車両周囲の温度や延焼状況および安全弁の作動タイミングを調べる。ガソリン車（排気量2000cc、SUV）の燃料タンクを取り外し、圧縮水素容器や主止弁などの高圧燃料配管系を搭載する改造を施し、水素燃料自動車を模擬した。



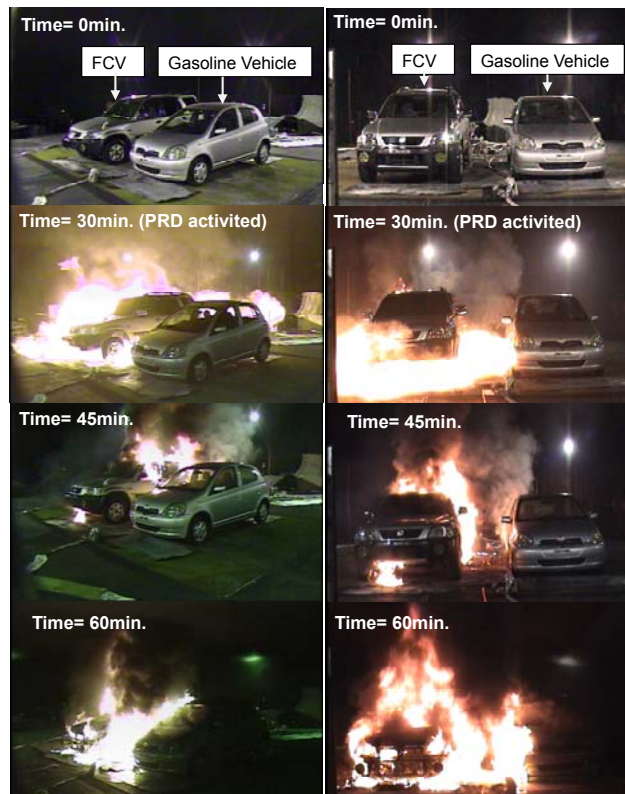
実験概要図

搭載した容器は、水素を満充填した 70MPa 容器（容積 36L）1 本であり、取り外したガソリン燃料タンクの部位に装着した。安全弁の作動は、容器の端部に設置したアルミニウム合金製の 25mm 角ブロックの中心部の温度が 110℃に到達した時点で、外部から強制的に弁を開くことにより模擬した。ベント管（内径 4.2mm）のガスの放出方向は、ガソリン車側の容器端部から地面に垂直に向けた。一方、ガソリン車（排気量 1000cc、ハッチバック、金属製燃料タンク）には、ガソリンを 10L 程度入れた。双方の車両間隔は約 0.85m とし、双方の後輪車軸がほぼ同位置になるように、駐車させた。出火箇所は、ガソリン車と反対側の水素燃料自動車の後輪タイヤとした。着火は、プロパンガスバーナを用い、接炎時間は 2 分とした。実験は、風雨の影響を受けない（財）日本自動車研究所の耐爆火災試験設備にて実施した。

<結果>

試験開始から 30 分後、容器の端部に設置した金属ブロック中の温度が 110℃に到達したため、安全弁の作動時期と判断し、水素ガスをベント管から放出させた。安全弁を作動させると、水素燃料自動車の床下全面は火炎で覆われ、水素燃料自動車自体の延焼範囲は拡大した。しかしながら、この時点では、隣接したガソリン車には着火しなかった。

ガソリン車に着火した時期は、試験開始から 57 分 26 秒後であり、安全弁を作動させてから約 28 分後であった。ガソリン車の着火箇所は、水素燃料自動車側の車両側面の前タイヤ付近であり、この時、水素燃料自動車はすでに全焼に至った状態であった。



実験結果

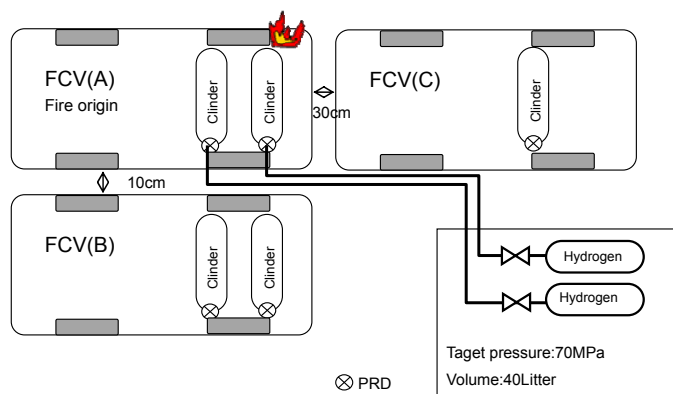
以上の結果、本試験条件では、隣接したガソリン車への着火は、直接的に安全弁作動時の水素噴出火炎が関与せず、その後の水素燃料自動車に全焼に至った際の内・外装品類による火炎によるものであることが分かった。

ii) 海上輸送想定での複数台水素燃料自動車火災試験

<試験方法>

本試験では、シナリオを以下のように設定した。

- ・ 自動車運搬専用船での車両輸送を模擬（駐車間隔、隣接車両も同一車両、窓は全閉）
- ・ 同一階層での火災
- ・ 出火位置は隣接車両に対して遠い箇所と想定される箇所で、かつ安全弁の作動も遅いと想定される後部タイヤ部位近傍（リアバンパ）からのもらい火火災を想定
- ・ 車両はステーションワゴン車（全長 4.685×全幅 1.695×高さ 1.96m）
ただし、換気条件は輸送船内のように半密閉状態ではなく、大気開放状態（当研究所の耐爆火災試験場）での試験とした。



実験方法概要

隣接車両は出火源となる車両（A車）の横側に1台(B車)、後側に1台（C車）の合計3台である。自動車運搬専用船での駐車間隔とし、横方向は10cm、前後方向は30cmの間隔で駐車させた。車両はすべて同一のガソリン車ベースに、ガソリン燃料タンクおよびマフラー類を取り外し、その床下に鋼製の模擬容器（直径318×全長800mm：40L相当の圧縮容器を想定）を搭載する改造を施した。模擬容器は、A車およびB車には後輪車軸の前後に1本ずつ（計2本）を、C車には後輪車軸の前に1本を搭載した。これらの模擬容器には、端部に作動温度104℃の金属溶栓式安全弁を装着した。これらの安全弁は、約8~10MPaの小容量のヘリウムガス源で加圧しておき、安全弁の作動状況を確認する。A車については、安全弁が作動した際、車両の外部から水素を供給（70MPa・容積40Lの容器×2本に水素を充填）し、安全弁作動時によるベント管（内径4mm）からの水素の放出を模擬した。水素の放出は、容器安全弁が設置されている箇所から斜め後方に45°、ベント管端部から地面までの距離30cmとした。温度計測は、車両周囲および床下の容器周りの72カ所をK型熱電対（シース径1.6mm）により計測した。

<結果>

試験開始から約109分後、側面に駐車したB車の右後部側面が着火した。114分後、A車はほぼ全焼に至り、後部に駐車したC車のフロントバンパとエンジンフードが着火した。試験開始約117分後、A車の後側タンク部位に装着したPRDが作動した。水素（充填圧力59.1MPa、容積40L）を後部タンクのベント管から放出させると、火炎はB車の車両中央部まで、C車の車両底部の後輪部まで及んだ。放出した水素は約2分間で、圧力が1MPa以下となり、水素の放出が終了した。試験開始119分47秒後、側面に駐車したB車の後側タンクの安全弁が作動した。ただし、B車には水素放出させる装置を取り付けていないので、水素放出はしていない。試験開始122分14秒後、A車前側タンクの安全弁が作動した。水素（充填圧力65.4MPa、容積40L）を前側タンクのベント管から放出させた。これにより、車両3台は全焼状態に至った。試験開始約144分後、その間までの間、出火車両の後方に駐車したC車の前側タンクの安全弁は作動しなかった。しかし、B車の後軸の後側のタンクの容器周囲の温度およびC車の後軸の前側のタンクの容器周囲の温度をみると、A車のPRDの作動による火炎によって、

急速に温度が上昇した。よって、本試験条件では、隣接車は車両内外装品類による火炎で着火したが、その後の安全弁の作動による水素火炎により、隣接車両の床下部の温度が上昇し、床下に設置した安全弁の作動を誘発させる可能性があることが分かった。



延焼の様子

i) ガソリン自動車と圧縮水素容器搭載車両との混焼、および ii) 海上輸送を想定した複数台の水素燃料自動車火炎試験を実施した結果、両試験とも、隣接車が着火した要因は安全弁作動時の水素噴出火炎が直接的には関与せず、車両内外装品類による火炎によるものであった。ただし、海上輸送などの接近した駐車間隔では、安全弁の作動による水素火炎により、床下に設置した安全弁の作動を誘発させる可能性があり、安全弁が作動する前に、迅速かつ適切な火災検知と消火活動を行うことが重要であると考えられる。

b. 高密度水素貯蔵技術の安全性評価

7. 液体水素容器の安全性評価

液体水素容器の安全性評価試験法策定に向けた基礎データを取得するために、以下の2項目を実施した。

(A) 車載用液化水素容器の基礎特性調査

(B) 液体水素漏洩試験

(A) 車載用液化水素容器の基礎特性調査

<目的>

車載用液化水素容器の安全性評価試験を実施する上での基礎データとして、断熱性能試験を実施し、静置状態でのボイルオフガス量や浸入熱量、および蒸発率などを調べた。

<方法>

試験用液化水素容器に液化水素を充填した後、容器内圧力を大気圧にし、静置状態のボイルオフガス発生流量を湿式流量計により測定した。得られたボイルオフガス発生流量より以下の式を用いて、試験容器の断熱性能を算定した。浸入熱量は、高压ガス保安法容器保安規則（以下、容器則という）を参照し、以下の式を使用して算出した。なお、本試験では、試験ガスに液化水素を使用し、気化潜熱は、「水素との物性と安全ガイドブック（NEDO）」より446000J/kgとした。さらに、ISO/DIS13985.3にタンク断熱能力の指針として定義づけされている「サーマルオートノミー試験を実施する。サーマルオートノミーとは、容器内圧力が大気圧状態から第一安全弁の設定圧力に到達するまでの時間である。本試験では、充填後に静置したタンク液面が50%に達した段階を測定開始とし、第一安全弁（以下、リリース弁という）の設定圧力である0.6MPaに達するまでの時間を測定した。

試験用液化水素容器の概要

内容積	68L
満充填水素量	4.4kg(90%充填、大気圧として)
最高充填圧力	1.00MPa
容器寸法	1000mm×φ400mm

<試験結果>

液化水素を容器液面77%まで充填した後、容器内圧力を大気圧にし、ボイルオフガス流量の測定を開始した。容器全体が冷却されるまで瞬時流量は若干高くなっているが、安定後のボイルオフガス流量は、2.0～2.1NL/min程度であった。また、液面の変化は外気温に大きく依存することがうかがえる。試験用容器の浸入熱量及び蒸発率を算定すると、浸入熱量は0.28-0.29J/h^oCL、蒸発率は5.57～5.96%/dayの結果を得た。

液化水素を56%まで充填した後、容器内圧力を大気圧にし、液面が50%となった時点より測定を開始した。容器内圧力が、大気圧からリリース弁開放圧力である0.60MPaに到達するまでの時間は、29時間であった。また、リリース弁開放後、ボイルオフガス放出は連続的に放出され、その瞬時流量は、2.2～2.9NL/minであった。以上の結果から、本液化水素68L容器の静置状態でのボイルオフガス量は2.0～2.1NL/minであり、浸入熱量は0.28-0.29J/h^oCL、蒸発率は5.57～5.96%/dayと算定した。また、サーマルオートノミー測定を実施し、液面50%、大気圧の状態からリリース弁が放出する圧力0.60MPaに達するまでの時間は29時間であった。

(B)液体水素漏洩試験

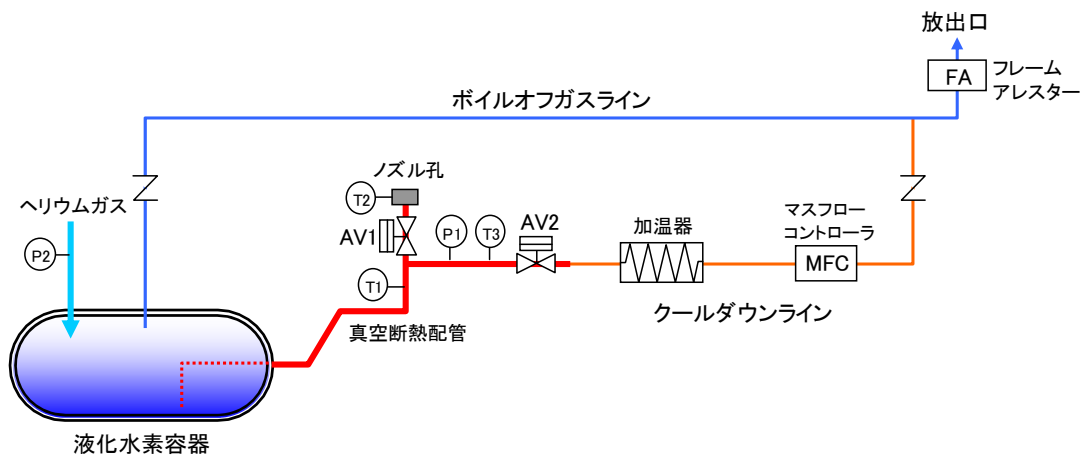
<目的>

自動車用液化水素容器が衝突等の外力を受けた際、損傷を受けた配管部等から液化水素が漏洩する可能性がある。自動車用圧縮水素容器では、衝突時の水素漏れ許容量が規定されているが、自動車用液化水素容器に関してはその様な規定が無いのが現状である。そこで、圧

縮水素容器の水素漏れ許容量と同等の液化水素が漏洩した場合、漏洩時の周囲水素濃度や引火時の影響など、気体水素と挙動が異なるかどうか調査するため、液化水素漏洩試験を実施する。

<方法>

液化水素容器からのボイルオフガスはボイルオフガスラインより、真空断熱配管クールダウン時に利用される水素ガスはクールダウンラインよりドーム外へ設置した放出管から排出する構造となっている。また、真空断熱配管（内管外側表面）、ノズル孔（外側表面）の温度測定には白金・コバルト側温抵抗体を使用した。



液化水素漏洩部 配管系統図

試験時の水素流量は、容器へのヘリウムガス加圧圧力やノズル径を変えることにより調節する。また、気体水素でも同一流量で試験する。

試験水素流量

水素流量[g/min]	
約 12	圧縮水素容器の水素漏れ許容量(131NL/min)
約 50~150	液化水素が噴出する条件で試験を実施

水素濃度センサは測定範囲の広い気体熱伝導式を使用し、高濃度用および低濃度用を試験流量によって適宜使用する。

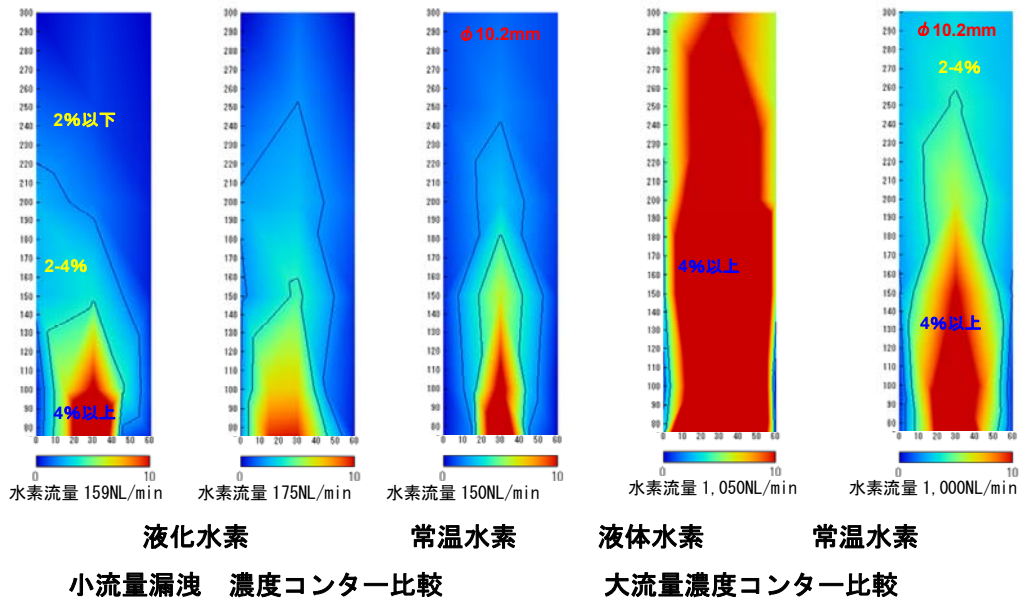
ノズル孔はブラインドガスケットに穴開け加工して作製した。また、ノズル孔から大気への放出は内径φ10.2mm、高さ25mmの配管を通り放出される。

<結果>

液化水素と常温ガス水素の小流量漏洩時の水素濃度を比較すると、水平方向の水素濃度は液化水素の方が2%あるいは4%以上の濃度範囲が若干広い傾向となっている。し

かし、両者に水素濃度範囲の大きな違いは見られない結果となった。

液化水素と常温ガス水素の大流量漏洩時(約 1,000NL/min)の水素濃度を比較すると、垂直方向、水平方向ともに液化水素漏洩時の方が常温ガス水素漏洩時よりも高濃度範囲が広がる結果となった。



また、

- ・本試験では、配管等による液化水素の気化を抑制するため、出来るだけ熱損失を抑えた試験装置を使用した。その結果、水素流量 150NL/min 程度の液化水素漏洩でも、ノズル噴出部直近では液体水素として噴出することを確認した。
- ・ノズル径 1.0mm による水素流量 1,500NL/min 程度の液化水素漏洩では、高さ約 300mm まで液体水素状態で噴出するが、地面には液体水素が全く溜まらず、殆ど全て上方に噴出し拡散することを確認した。
- ・液化水素の影響によりノズル孔周りには固体空気が発生し付着した。その影響で液化水素の噴出方向が鉛直上方向からずれ、水素濃度を計測できない場合があった。
- ・大流量漏洩では、液化水素と常温ガス水素の濃度分布に大きな差が見られた。水素の噴出速度や空気への拡散速度の差が影響していると推察される。
- ・今回、液化水素容器のボイルオフガス等による水素漏洩に対処した試験装置を使用することにより、屋内での液化水素漏洩試験を安全に実施することが出来、屋内で液化水素を扱う試験を実施する上で必要な技術を習得することが出来た。

c. インターフェースの標準化

ア. 高圧水素充填コネクタの安全性評価

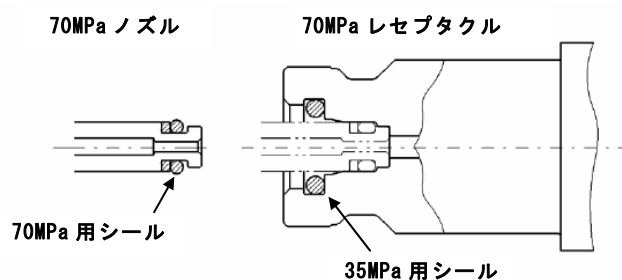
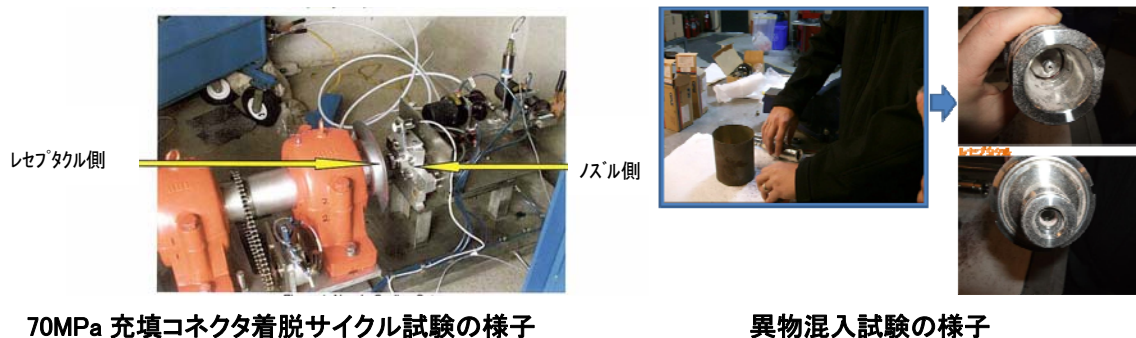
(A) 充填コネクタの耐久試験

<目的>

燃料電池自動車の普及促進には、水素充填コネクタの構造ならびに車両と水素ステーションとの通信に関する国内関連法規を整備し、国際標準化を推進する必要がある。そこで本事業では、日本仕様の70MPaコネクタの耐久試験を実施した。

<結果>

日本提案方式70MPaレセプタクルの耐久試験はすべて合格した。この結果から、この構造はISO-17268のベースとなるSAE（米国自動車技術会）にて、DISに採用された。また、平成19年度以降でのJHFC（水素・燃料電池実証プロジェクト）実証試験に用いる標準コネクタとして選定された。



日本提案の70MPaノズルの構造

(B) 微量充填試験

<目的>

非通信充填プロトコルの一つとして検討されている質量基準充填方式は、充填を行う前に微量の充填を行い、その際の充填量および圧力上昇から容器容積を推定し、充填量や充填速度の決定を行うという手法であり、安全かつ効率良く充填するためには、容器容積推定の精度が求められる。本試験では、質量基準充填方式で行う微量充填時の容器内温度上昇度を把握し、容器容積推定精度の向上に資するデータの取得、および最適な微量充填条件の

検討を行うため、容器内温度上昇度に及ぼす容器初期圧力や充填流量の影響を調査する。

<試験方法>

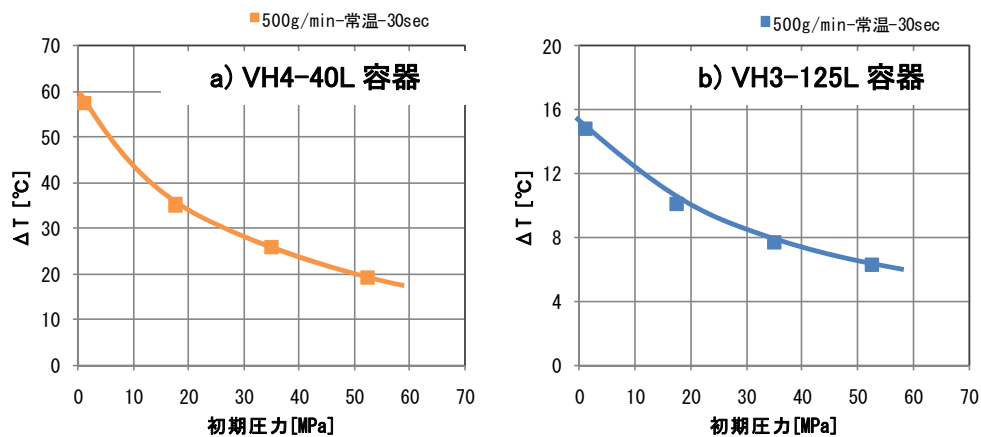
試験容器は、70[MPa] の VH3 容器（容量 125L）および VH4 容器（容量 40L） の 2 種類を使用した。

試験条件

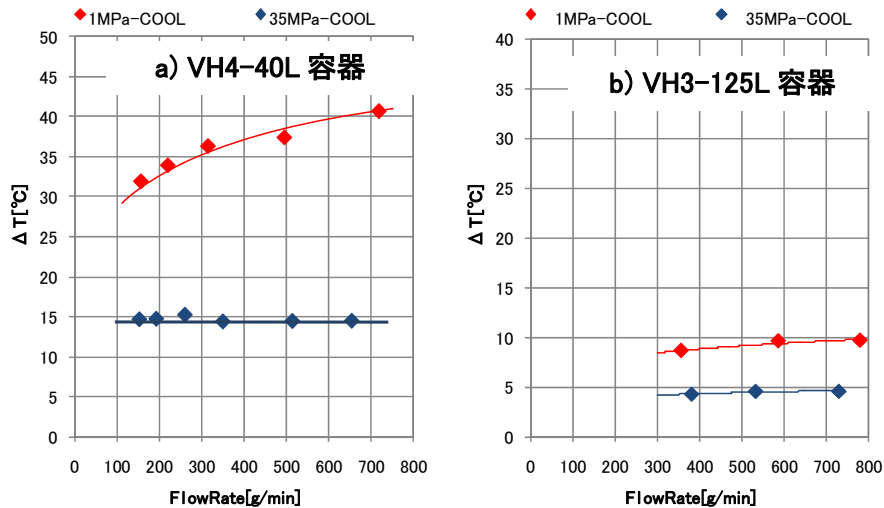
Filling pattern	Constant rate ofFlow
Initial Pressure	1、17.5、35、52.5 [MPa]
Flow Rate	150~700[g/min]
Filling Gas Temperature	Normal temperature Pre-Cool (Ambient-25°C)
Filling Time	60[sec]

<試験結果>

試験の結果、初期圧力により温度上昇度が異なる（初期圧力が高くなると温度上昇度が小さくなる）こと。初期圧力が低い場合、充填流量により温度上昇度が異なる（充填流量が大きくなると充填量に対する温度上昇度が大きくなる）。初期圧力が高い場合、充填流量の影響は確認されなかったこと・容器により温度上昇度が異なること。充填流量を小さくすると、容器による温度上昇度の差は小さくなる傾向があることが分かった。



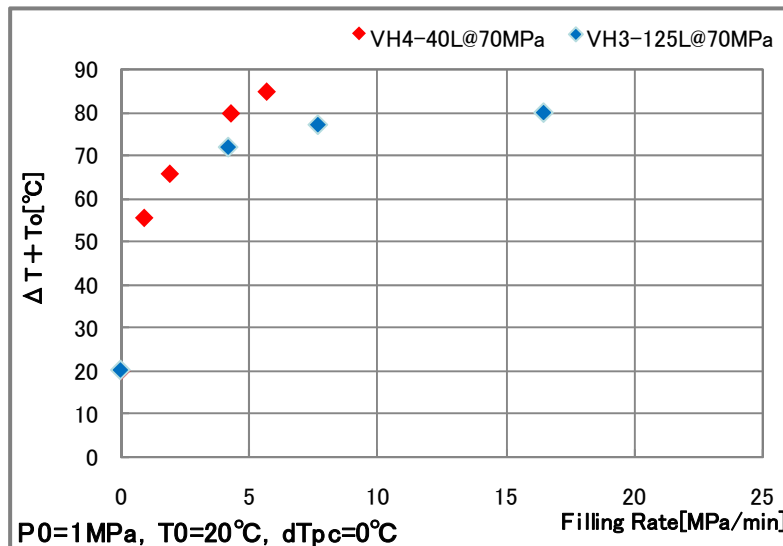
初期圧力の影響



充填流量の影響

(C) 充填プロトコルおよび充填マップ検証試験

非通信充填プロトコルの一つである圧力基準充填方式では、安全に充填を実施するための充填マップ（各初期条件に応じた充填速度/充填圧力マップ）を水素ステーション側に用意し、指定された充填速度で停止圧力まで充填を行う。充填マップでは、環境温度、充填ガス温度、初期圧力に応じて充填速度および充填圧力が決定される。本研究では、充填マップは、SAEの場で議論されている Look-up Table（70MPa@15°Cを基準量とし、87.5MPa@85°Cまでの充填を目標）を日本国内用に修正（70MPa@35°Cを基準量とし、充填圧力上限を70MPaに設定）したものを作成した。



試験結果一例 ～充填速度とΔTの関係～

(初期圧力：1MPa, 環境温度：20°C, プレクール無し (dT = 0°C))

また、充填コネクタの有無による容器内温度上昇度の変化は、主に充填ガス温度、充填圧力挙動等の変化によって引き起こされるものと推察される。そこで、実規模レベルで検証を行うため、充填による温度上昇度の変化量の大きい小容量の VH4 容器を用いて-20°Cプレクール充填を行い、充填コネクタの有無による比較を行った。絞りが容器内温度へ及ぼす影響の度合いは充填コネクタの内径に依ることになることから、本試験では、今後国内の水素ステーションでの使用が見込まれる内径 2.2 mm の充填ノズルを用いた（充填コネクタ前後の配管内径は 5.2 mm）。なお、圧力および温度の計測は充填コネクタの前後近傍に取り付けた圧力センサー（ P_{us} と P_{ds} ）および温度センサー（同 T_{us} と T_{ds} ）にて行った。



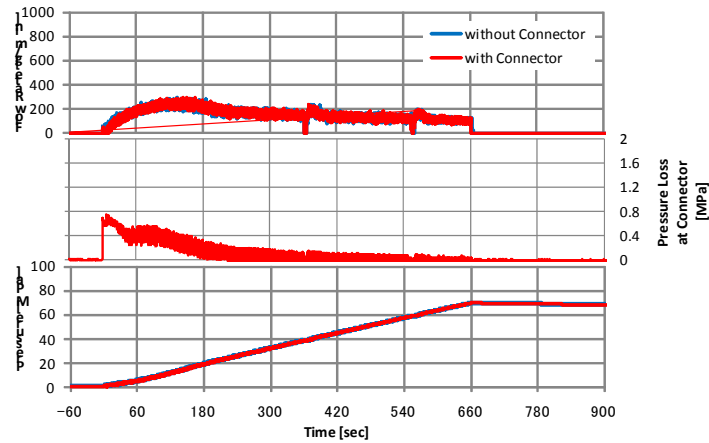
充填コネクタ外観

Lookup Table (70MPa, Cap ≤ 6kg, -20°C)

Ambient Temperature (°C)	Avg Ramp Rate (MPa/min)	Ref: Fill Time for Empty Tank (min)	Target Fill Pressure (MPa)													
			Initial Tank Pressure (MPa)													
			2	5	10	15	20	30	40	50	60	70	> 70			
> 50	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
50	1.2	58	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	69.9	68.9	68.4	67.9	67.9	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
45	1.6	43	70.0	70.0	70.0	70.0	69.9	69.4	68.4	68.4	67.9	67.4	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
40	2.2	30	70.0	70.0	70.0	69.9	69.4	68.9	68.4	68.4	67.9	67.4	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
35	2.9	24	70.0	70.0	69.9	69.9	69.4	68.9	68.4	68.4	67.9	67.4	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
30	3.6	19	70.0	69.9	69.4	68.9	68.4	67.9	67.4	67.4	66.9	66.4	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
25	4.6	15	69.9	69.4	68.9	68.4	67.9	66.9	66.4	65.9	65.4	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
20	6.3	11	69.4	68.9	68.4	67.9	67.4	66.4	65.9	64.9	64.4	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
10	8.8	8	68.9	68.4	67.4	66.9	65.9	64.9	64.0	63.0	62.0	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
0	10.9	6	67.9	67.4	66.4	65.4	64.9	63.5	62.0	60.5	59.1	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
-10	12.5	5	66.9	66.4	65.4	64.4	63.5	61.5	59.6	58.1	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
-20	12.5	5	65.9	64.9	63.5	62.5	61.5	59.6	57.6	55.2	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
-30	12.5	5	63.0	62.0	61.0	59.6	58.6	56.6	54.7	52.3	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
-40	12.5	5	61.0	60.5	59.6	58.6	57.6	55.7	54.2	52.3	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling
< -40	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling	no fueling

試験した充填速度と充填終了圧力

充填流量とコネクタ部の圧力損失および充填圧力挙動をみると、充填コネクタ部における圧力損失は最大でも 0.8MPa 以下と比較的小さく、また、充填コネクタの有無による充填流量の変化は見られなかった。そのため、充填圧力挙動についても双方に差はほとんど生じていない。この試験条件では充填コネクタを取り付けることによって昇圧速度が不安定になるなどといった、充填圧力挙動への影響はほぼないことが確認された。



流量および充填圧力の比較とコネクタ部圧損

d. 要素部品の安全性評価

ア. 附属品の安全性評価

<目的>

燃料電池自動車の普及に伴い、バルブ、センサーなどの要素部品の技術が促進され、現行基準の範囲に含まれない材料、作動機構などを備えた部品が開発されている。これらの要素部品の安全性や信頼性の評価には、試験法の整備および現行基準の見直しが必要である。本事業では、(A) 安全弁作動試験における作動媒体や圧力の影響、(B) 輻射熱による安全弁作動試験について調査し、試験法案策定に資するとともに、国際基準調和のためのデータにも活用する。

(A) 安全弁作動試験

<目的>

現行では認められていない作動機構を有するガラス式安全弁を含めた作動試験を実施し、作動媒体や圧力の影響を調査した。

<方法>

3種類の温度作動式 PRD を試験した。

供試PRD

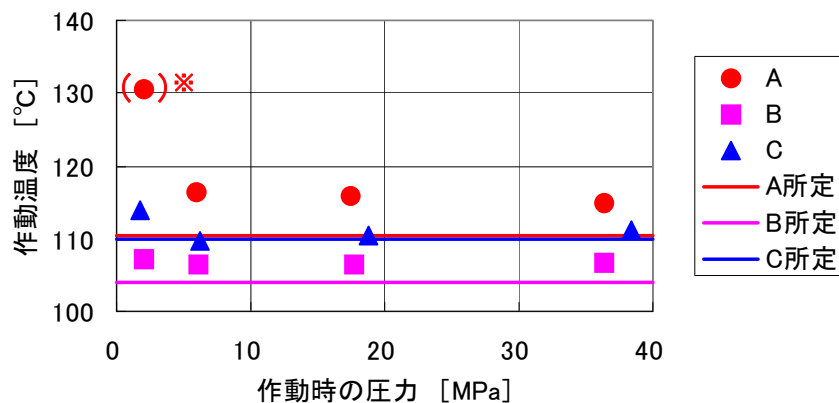
供試 No.	最高充填圧力 [MPa]	所定作動温度 [°C]	方式	作動原理
A	35	110	溶栓式	軟化した溶栓(ボタン形状)がバネ力で押されピストンが移動
B	35	104	溶栓式	軟化した溶栓(リング形状)がガス圧で拡がりピストンが移動
C	35	110	ガラス管式	ガラス管中の液体が熱膨張してガラス管が破壊しピストンが移動

PRD を取付けた加圧系に、室温で圧力媒体を充填して加圧した。ストップバルブを閉じた加圧系を熱媒体のグリセリン浴中に浸漬・昇温して PRD を作動させた。圧力媒体に不活性

ガス(N₂ガス)を用いた。

<結果>

圧力媒体に N₂ ガスを用いた供試 No. A の PRD 作動試験では、PRD が作動すると内圧は瞬時に 2~4MPa 程度まで低下するが、以降は圧力低下速度が遅くなり、数分経過後も 2MPa 前後の内圧を保持した。充てん圧を 1.5MPa とした場合は、PRD 作動が明確に確認されなかった。しかし、供試 No. B、C では、PRD 作動によって充てんガスが瞬時に全放出された。以上の結果、現行で認められている溶栓式の安全弁は、作動媒体圧力が 5MPa 以下であると、所定の作動温度では作動しないものがあることが分かった。



*:PRD作動が確認できないので、圧力低下開始時の温度を
作動温度とした。

安全弁作動試験における作動時の圧力と作動温度の関係

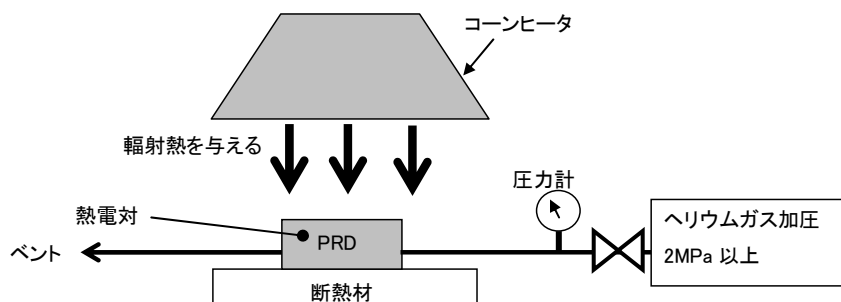
(B) 輻射熱による安全弁作動試験

<目的>

安全弁を作動させる上での熱形態のひとつである輻射熱を取り上げ、輻射熱による安全弁の作動影響について調査を行った。

<方法>

供試体は、2種類の温度作動式 PRD (複合式バルブを含む) とこれらの黒体塗料で塗った PRD の計 4 種類である。安全弁には 2MPa 以上のヘリウムガスを加圧させ、コーンヒータにより一定の輻射熱を与え、安全弁の作動に至る時間を測定した。

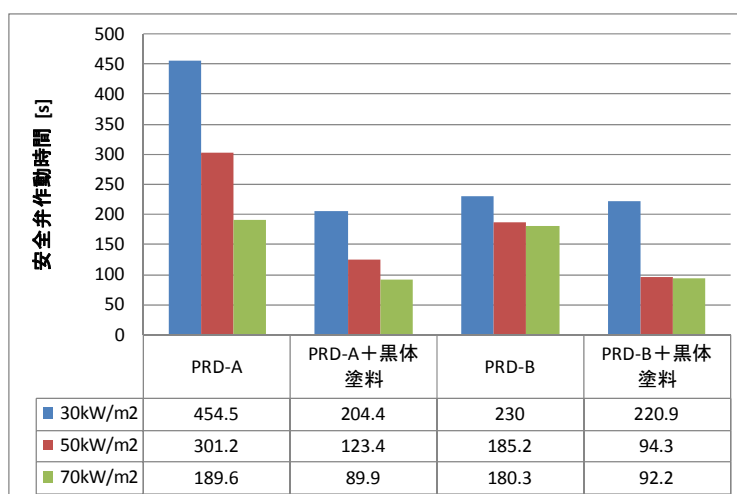


実験方法

<結果>

- 1)安全弁に与える輻射熱が大きいほど、安全弁の作動時間が早くなる。
- 2)PRD-A(金属溶栓式)とPRD-B(ガラス式)を比較すると、PRD-Bの方が早くなる。
- 3)同じ安全弁であっても黒体塗料を塗った方が安全弁の作動時間は早くなる。
- 4)双方の安全弁の作動時間は、輻射熱が小さいほど、差が大きい。
- 5)安全弁の作動時間が長いほど、安全弁作動時の溶栓近傍での安全弁本体の温度は低い。

以上のことから、安全弁の作動には、溶栓を取り巻く安全弁本体にも影響することが考えられ、火炎からの輻射熱も安全弁の作動に大きく影響することが分かった。なお、これらのデータは燃料電池自動車の船舶輸送の規制緩和のためのデータにも活用した。



各 PRD の輻射熱と安全弁作動時間

(C)水素消費による主止弁、減圧弁などの附属品類の温度測定

<目的>

附属品の高圧化対応、使用温度範囲拡大に資するデータを取得するため、水素放出条件による容器および附属品等の温度変化量を把握した。

<方法>

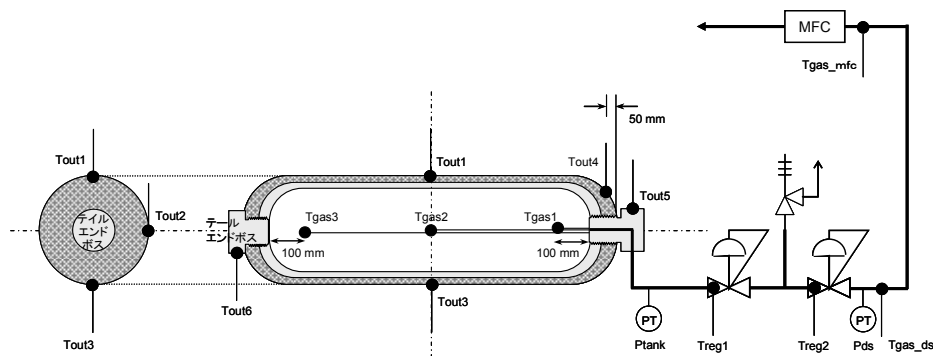
試験は内容積 41 LのVH3 容器を使用し、常温環境下から水素を容器の外部へ放出した。水素の放出開始圧は主に 70 MPaとした。放出流量は 200 NL/minを基準に減量・増量した 4 水準 (50、100、200、400 NL/min) とした。水素放出時の容器姿勢は横向きおよび縦向き (放出口が上・下) の 3 水準とした。

試験条件

放出開始圧 [MPa]	容器姿勢	水素放出流量 [NL/min]			
		50	100	200	400
70	横	○	○	○	○
	縦-放出口上	○		○	
	縦-放出口下	○		○	○
35	横			○	

○: 試験実施条件

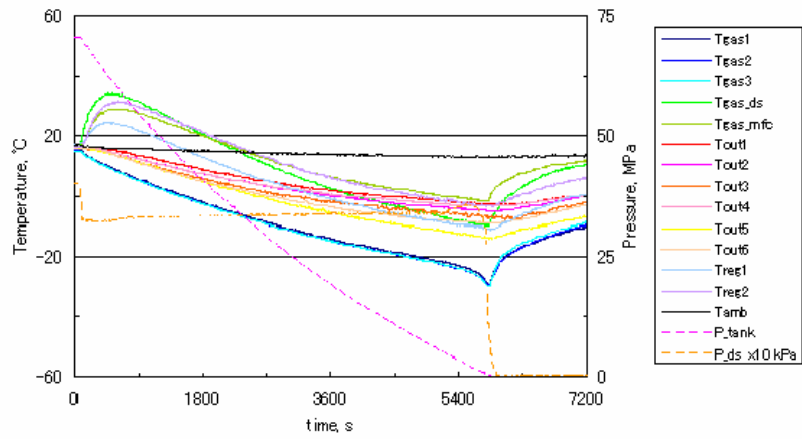
本試験では、T形シース熱電対および圧力トランスデューサを用いて容器および水素放出時の流路上の温度および圧力を計測した。また、試験時の容器の外観の様子は赤外線熱画像装置により記録した。



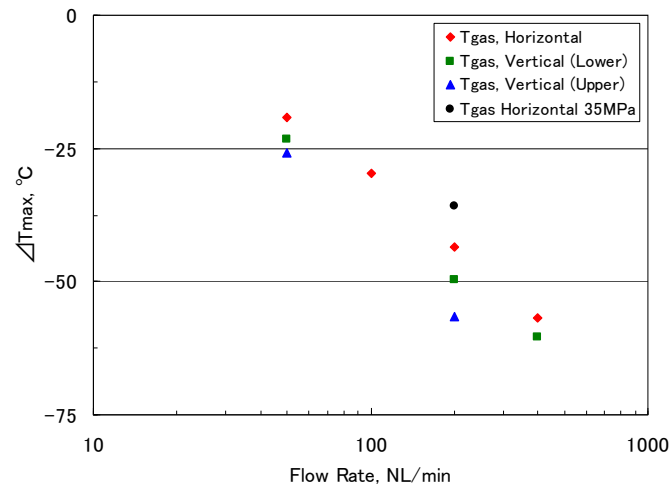
計測系設置位置(容器横置き)

<結果>

供試容器・附属品等については、常温環境下で容器から流量 400 NL/min で水素を消費した場合、初期温度に対し容器内ガスでは 50℃以上、附属品については 30℃以上の温度降下が起き、容器が縦置きの場合には横置きの場合よりも変化量大きいことが確認された。50~400 NL/min の範囲では流量を対数でとると最大温度変化量は直線的に変化することがわかる。また、流路に絞りがある場合、絞りの効果（ジュール・トムソン効果）でガス温度が上昇し、近傍の機器類も昇温することになるが、その変化量は+20℃程度であり、容器・附属品やその他の機器類へ深刻な影響を与えるものではないものと推察される。



容器横置き時の温度および圧力の経時変化 $Q = 200 \text{ NL/min}$



容器内ガス(Tgas)の最大温度変化量

②燃料電池性能評価法の標準化

燃料電池自動車の普及促進を図っていくためには、性能評価法の標準化、燃料品質の規格化などソフトインフラの整備が不可欠である。近年は ISO/TC197/WG12（水素燃料仕様）や ISO/TC22/SC21/WG2（電動車両の性能・燃費）等において、国際標準（IS: International Standard）策定に向けた審議が活発化している。標準化活動は原案作成の目標期間が定められており、これに従って審議・投票、規格の制定が行われる。積極的な取り組みをアピールして主導的な立場を担うには、定量的かつ客観的なデータを提出して意見を述べることが重要であり、以下の研究開発を進めた。

（ア）燃料電池新規材料の評価試験方法

a) 新規 MEA への水素中不純物の影響評価

<目的>

水素中の不純物の中には燃料電池の触媒や膜などに影響を及ぼすことで発電性能を低下させるものがあり、その影響の度合いは触媒や膜材料の仕様により異なるものと考えられる。MEA 材料の違いに対する水素中の不純物の影響を評価し、ISO/TC197/WG12（水素燃料仕様）における IS 策定に資するデータを取得する。

平成 19 年度までに水素の品質規格策定のための評価に適用してきた MEA は限られた仕様であった。特に、MEA のアノード側の触媒担持量（0.4mg-Pt/cm²）の設定値は、将来の燃料電池スタックを考慮した値よりも大きいものであった。限られた種類の MEA、限られた触媒担持量での評価結果では、品質規格を策定するために十分なものとはいえない可能性がある。そこで、アノードの Pt 担持量を低減した場合に、水素燃料中の不純物が燃料電池の発電性能の低下に及ぼす影響を調査した。さらに、使用する触媒や電解質膜を任意に設定可能な、従来とは異なるメーカーの MEA（以下 A 社製 MEA と記述）を入手し、水素燃料中の不純物が単セルの発電性能に及ぼす影響の調査を進めた。

<方法>

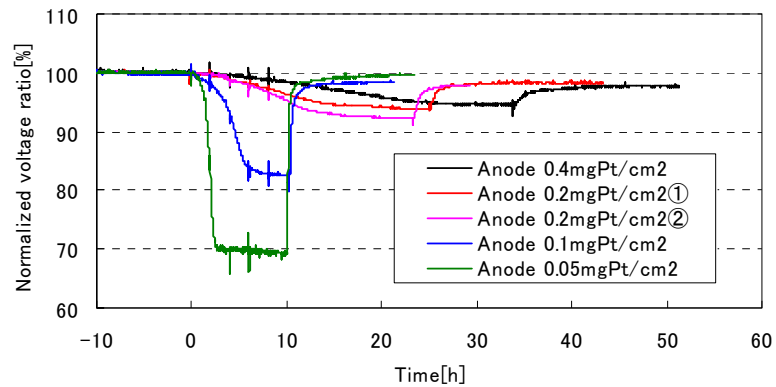
高純度水素（純度 $\geq 99.99999\%$ ）を燃料として、1000mA/cm²の定電流制御でセル電圧を安定させた（以下、初期電圧とする）。セル電圧が安定した後、不純物を添加した水素を燃料として 10 時間の電圧変化を測定し、初期電圧に対する電圧変化を測定した。

<結果>

アノードの Pt 担持量が水素中の CO、H₂S、NH₃ によるセル電圧の低下に及ぼす影響について調査してきた。その結果、Pt 担持量の影響は不純物の種類によって異なる可能性が高いことがわかった。CO については、Pt 担持量の低減に伴ってセル電圧の低下量は大きくなった。H₂S については、Pt 担持量の低減に伴って電圧低下が早くあらわれた。NH₃ については、Pt 担持量がセル電圧の低下に及ぼす影響は観察されなかった。

また、両極の Pt 担持量を揃えた MEA について、Pt 担持量が不純物による性能低下に及ぼす影響を調査した。性能低下の挙動は不純物の種類によって異なり、評価した Pt

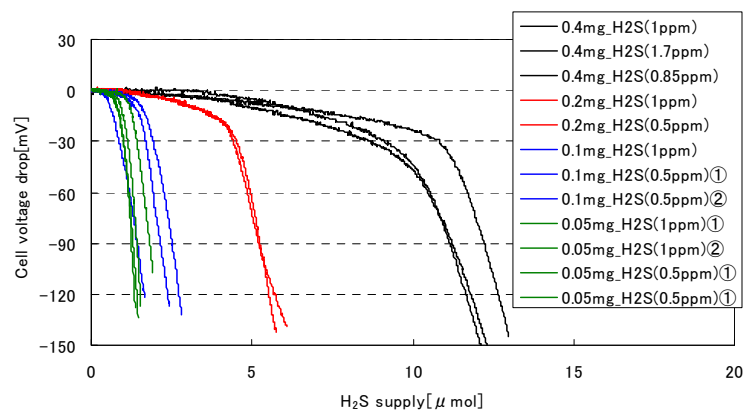
担持量の範囲では、CO によるセル電圧の低下には Pt 担持量の影響は小さく、NH₃ や H₂S による性能低下には Pt 担持量が影響することがわかった。カソードの Pt 担持量を一定にし、アノードの Pt 担持量のみを低減させた上記の検討結果もあわせて考慮すると、CO および H₂S についてはアノードの Pt 担持量が、NH₃ についてはカソードの Pt 担持量が、発電性能の低下に影響を及ぼしている可能性が高い。不純物の種類によっては、アノードの Pt 量のみではなく、カソードの Pt 量も考慮して、許容濃度を議論する必要があると考えられる。



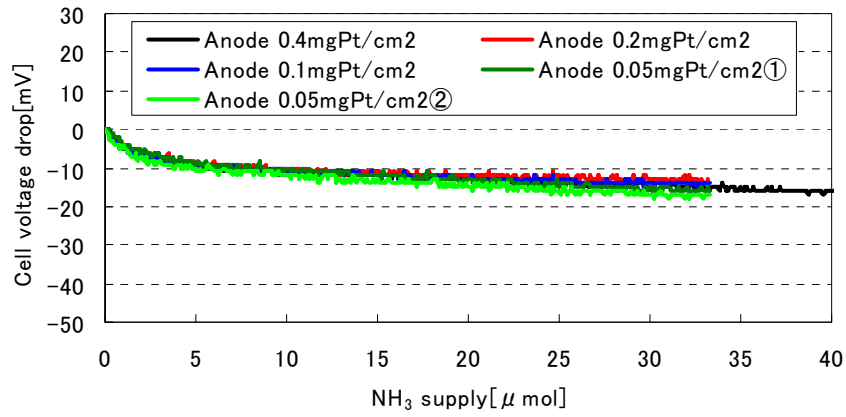
アノード Pt 担持量とセル電圧維持率(CO 1ppm 添加水素)

Pt 担持量が CO による電圧低下に及ぼす影響

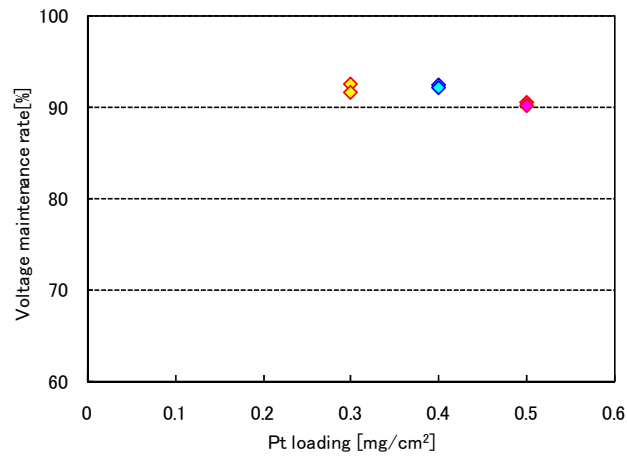
Pt 担持量 [mg/cm ²] (Anode / Cathode)	CO 濃度 [ppm]		
	0.2 (許容濃度)	0.5 [ppm]	1.0 [ppm]
0.05 / 0.4	96.4%(21mV) 96.8%(19mV)	88.4%(70mV)	69.5%(185mV)
0.1 / 0.4	97.2%(17mV)	96.9%(19mV) 96.4%(22mV)	82.6%(105mV)
0.2 / 0.4	-	96.6%(21mV)	93.6%(39mV) 92.4%(46mV)
0.4 / 0.4	-	-	94.5%(32mV)



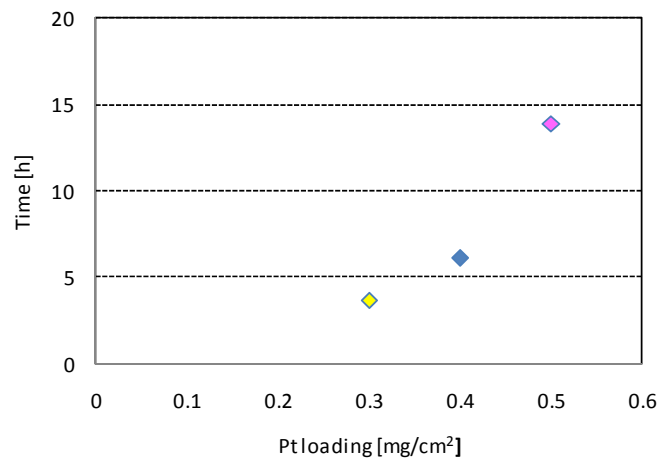
アノードの Pt 担持量が H₂S の供給量と電圧低下に及ぼす影響



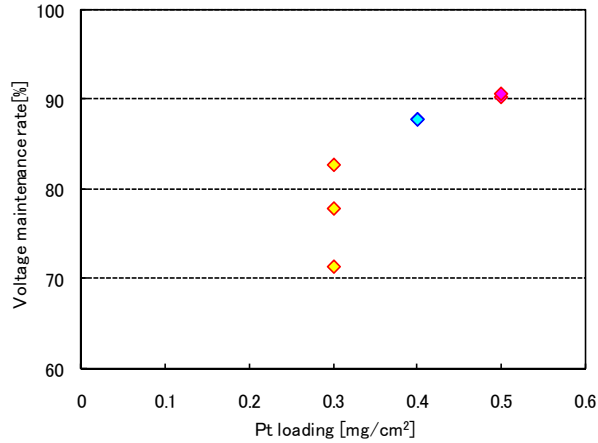
NH₃ 供給モル数とセル電圧低下量の関係



CO(2ppm)添加 10 時間後の電圧維持率



H₂S(3ppm)添加後電圧が 10%低下するまでの時間



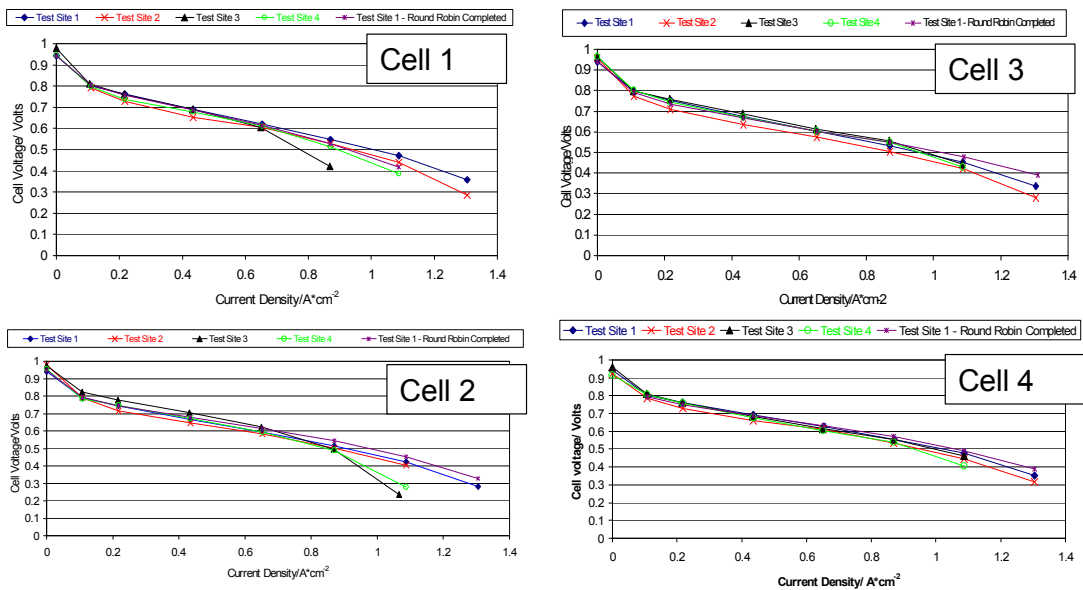
NH₃(10ppm)添加 10 時間後の電圧維持率

b) 参照極付き JARI 標準セルの開発

・単セル試験方法

<目的>

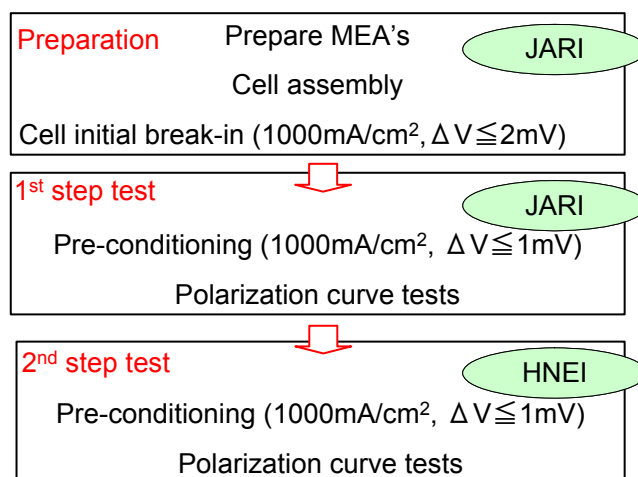
水素燃料中の不純物が燃料電池の発電性能に及ぼす影響を再現性よく評価するために JARI 標準セルによる発電性能評価試験方法を開発してきた。一方、米国 USFCC と JARI の研究協力の中で、燃料電池単セル試験法の整合が必要との認識で一致し、JARI 標準セルを用いたラウンドロビンテスト (RRT) の実施も検討されている。また、米国で実施された Teledyne 社製単セルを使用した RRT では、試験条件・手順等の統一がなされていなかったため、各研究機関の間で大きなばらつきを示す結果となった。JARI 標準セルおよびこれを用いた JARI 単セル試験方法の信頼性を確認するために、Hawaii Natural Energy Institute (HNEI) との単セル性能のクロスチェックを実施した。



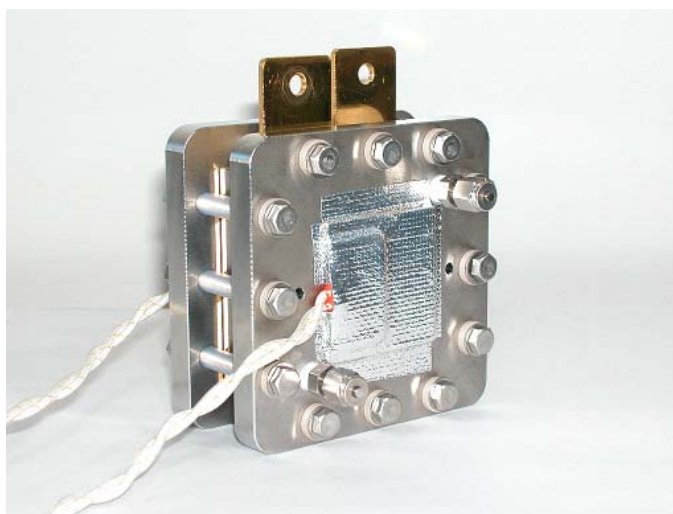
USFCC_RRT(セル温度 80°C)の結果 (207th EGS meeting)

<方法>

HNEI (Hawaii Natural Energy Institute) および JARI にて同一のセルと発電試験条件で電流-電圧特性を評価することで、燃料電池単セル性能のクロスチェックを実施し、得られた性能評価結果がどの程度一致するかを調査した。試験手順・試験条件を統一して、両研究機関にて IV 性能を測定した。



HNEI-JARI クロスチェック試験手順



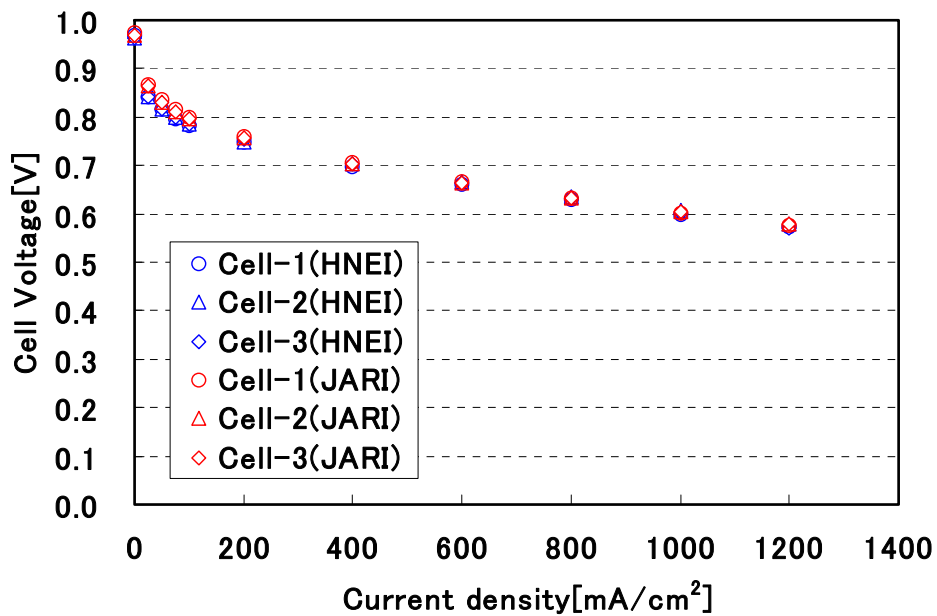
JARI standard single cell



Polarization curve test in HNEI

<結果>

JARI 製 MEA、JARI 標準セル、JARI 単セル試験方法を用いた単セル性能評価のクロスチェックを Hawaii Natural Energy Institute (HNEI) との間で実施した結果、単セル性能（電流-電圧特性）の測定結果に高い再現性がみられた。燃料電池自動車用水素規格 (ISO/DTS 14687-2) 策定のために提供してきたデータも含め、JARI における単セル性能評価結果の信頼性を確認した。

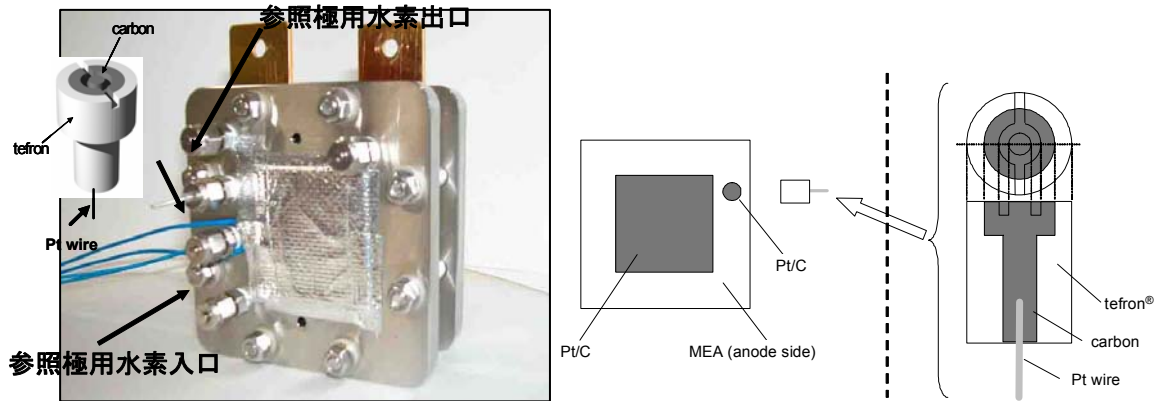


HNEI-JARI 単セル性能クロスチェック結果

・参照極付き J A R I 標準セル

<目的>

燃料電池用材料特性評価、水素中不純物および付臭剤のセル性能への影響メカニズム解析の必要性に対応する。

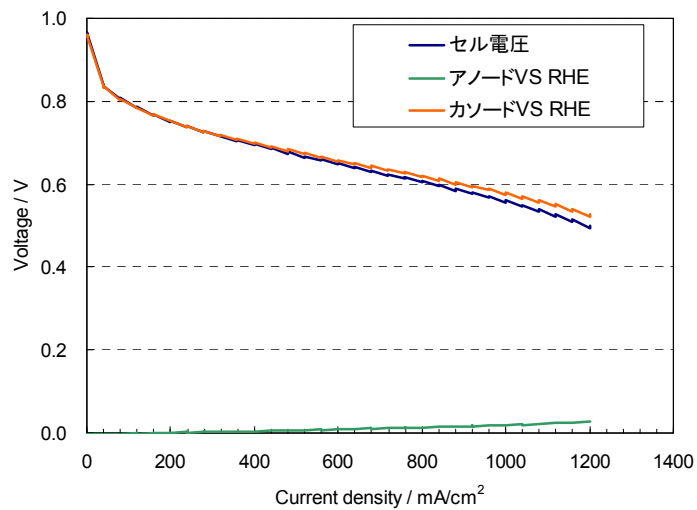


参照極付き JARI 標準セル

<方法>

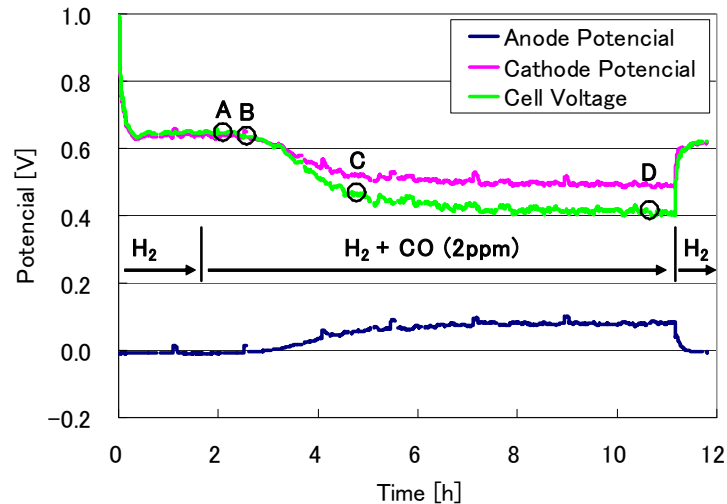
MEA のアノード側に両極の電位の基準となる参照極 (RHE;可逆水素電極) を設置した。

<結果>



両極での分極特性の評価例(H2)

参照極(RHE)に対するカソード電位とアノード電位の差がセル電圧に一致. 両極電位を分離できていることを確認した。



両極での分極特性の評価例(H₂+CO 2 ppm)

(イ) 燃料電池耐久性評価試験方法

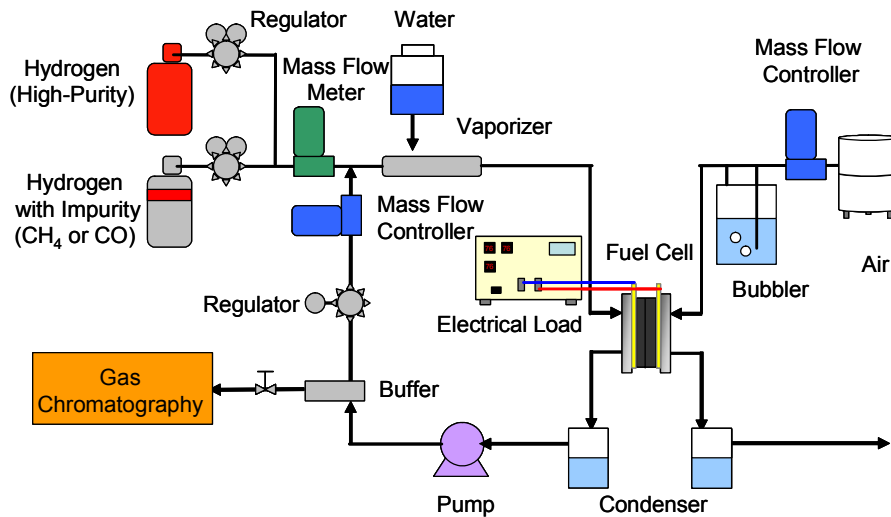
・水素循環系での不純物濃縮の評価

<目的>

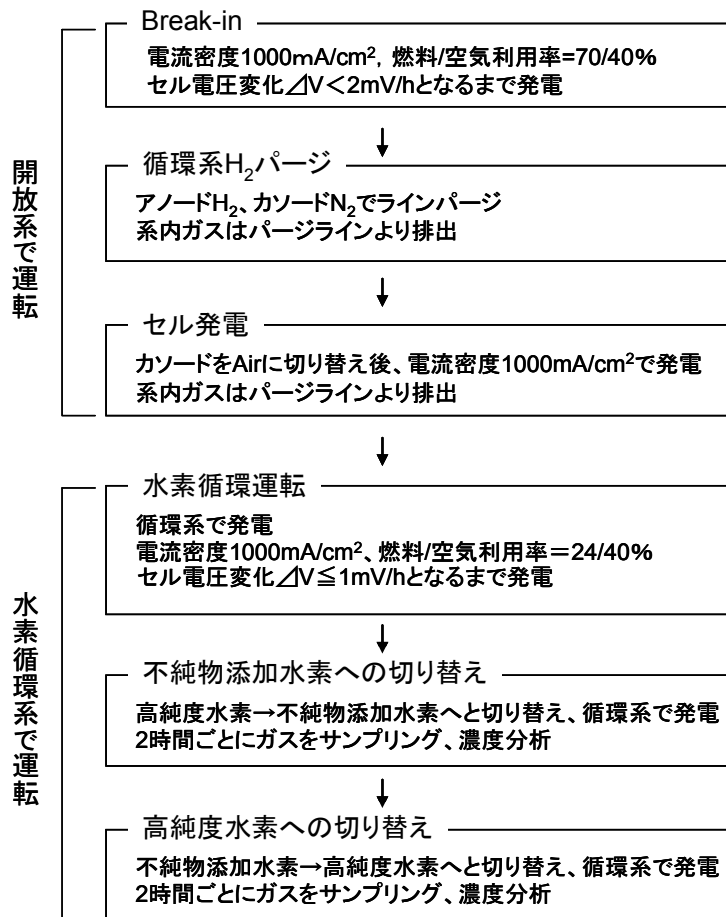
TS案における各不純物の許容濃度は、水素循環系で不純物成分が濃縮することを前提として、10時間での評価において影響を与えない最大濃度よりも小さい値(例：1/500)としている場合がある。この許容濃度の妥当性を検証するため、水素循環系における不純物濃縮挙動について調査する。不純物の濃縮を考慮して策定した燃料電池自動車用水素のTS: Technical Specification (技術仕様書)の妥当性を確認するために、CH₄とCOの水素循環系での濃縮挙動を調査した。CH₄の濃度変化は、クロスリーク、物質変化、吸着、水溶性の影響がないと仮定して予測した濃度変化と一致したが、COについては予測式があてはまらず、CO₂が増大することを明らかにした。他の不純物も含めて循環系での挙動を調査し、今後のIS: International Standard (国際標準)化のための議論の基礎データとする。

<方法>

まずセルのBreak-inを、高純度水素 249mL/min(U_F=70%)、空気 1037mL/min (U_a=40%)、電流密度 1000mA/cm²の条件で、セル電圧変化がΔV<2mV/hとなるまで行った。Break-in終了後、アノードにH₂、カソードにN₂を流し、水素循環系のラインパージを行った。パージ終了後、カソードガスを空気に切り替え、電流密度が1000mA/cm²となるまで負荷電流を段階的に増大させた。その後循環運転へと切り替え、セル電圧変化ΔV≤1mV/hとなるまで発電を行った。セル電圧安定後に、高純度水素から不純物(COまたはH₂S)添加水素へと切り替え、発電を行った。不純物添加水素による試験終了後に再び高純度水素に切り替え、循環運転のまま発電を行った。

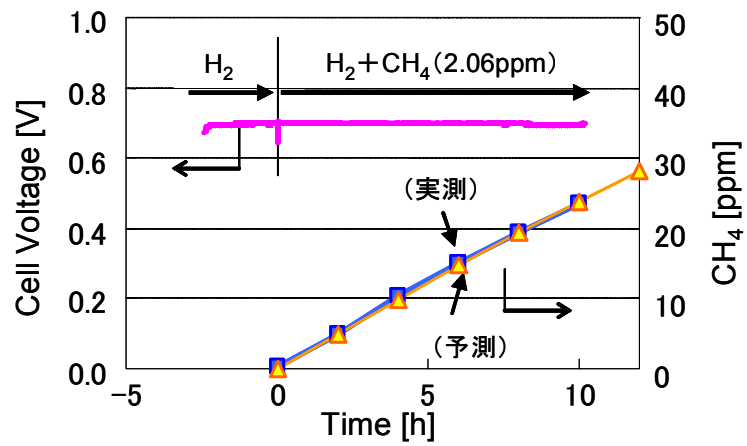


水素循環系の装置構成

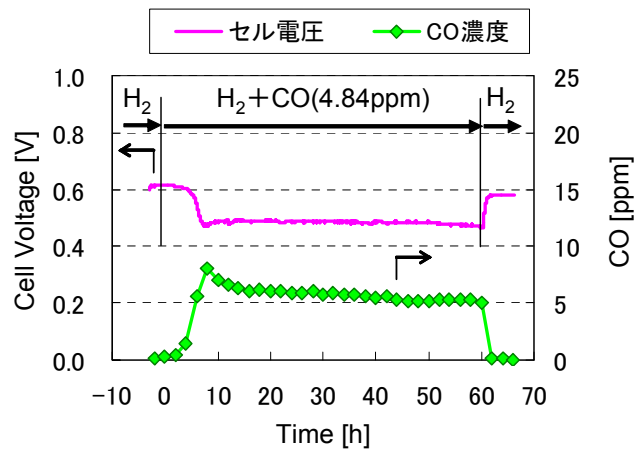


水素循環系での不純物濃縮挙動の評価試験手順

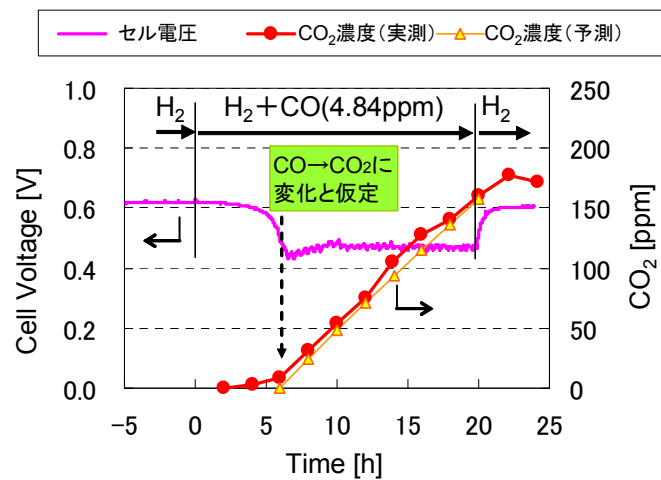
<結果>



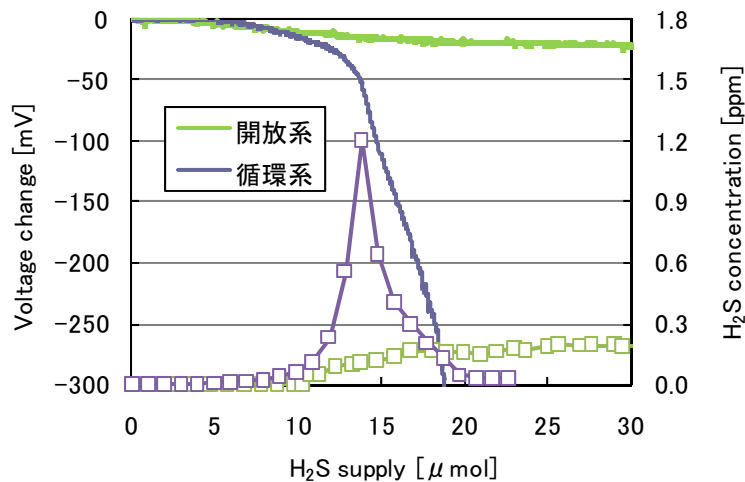
CH₄の濃度変化(500mA/cm²)



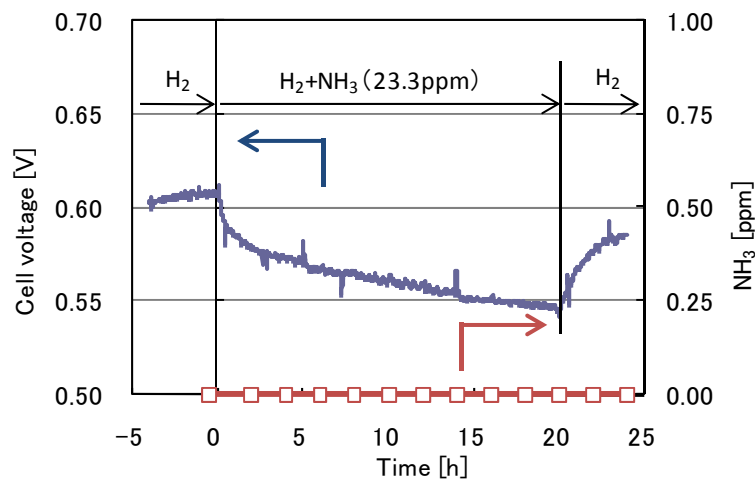
CO 添加水素を用いた循環発電での CO 濃度
(1000mA/cm²、、パーセント率 0.5%)



CO 添加水素を用いた循環発電での CO₂ 濃度(1000mA/cm²、パーセント率 0.5%)



H₂+H₂S(1.6ppm)でのセル電圧と H₂S 濃度



H₂+NH₃(23.3ppm)でのセル電圧と NH₃ 濃度

CH₄ は膜中クロスリーク、物質変化、吸着、水溶性の影響が小さいため、これらの仮定が成り立つ不活性ガスに対して求めた予測式により算出した濃度変化と一致した。CO 濃度は一定の値に収束し、予測式と一致しなかった。膜クロスリーク、物質変化、吸着、水溶性の影響が一つでも考えられる不純物については、予測式が成り立たないことがわかった。水 CH₄、N₂、He など燃料電池の発電性能に影響を及ぼさない物質は濃縮し、CO、H₂S、NH₃ のような発電性能に影響を及ぼす物質は濃縮しなかった。濃縮挙動は、それぞれの物質がもつ吸着性、反応性、水溶性、クロスリーク性などが影響を及ぼすことがわかった。現在の ISO/TS14687-2 は不純物が最大で 500 倍まで濃縮すると仮定して作成されており、今回得られた個々の不純物の濃縮挙動を ISO の規格（不純物の許容濃度）に反映していく予定である。

水素中不純物の濃縮挙動まとめ

対象物質	試験濃度	濃縮	触媒吸着	物質変化	クロスリーク	水溶性	アノードの水素循環系での濃縮挙動
CH ₄	2 ppm	○	×	×	—	×	カソードへのクロスリークの影響は小さいため、予測濃度に近い濃縮挙動を示す。
He	100 ppm	○	×	×	○	×	カソードへのクロスリークがあるため、予測濃度ほどは濃縮しない。
N ₂	0 ppm (カソードからのリークを測定)	○	×	×	○	×	カソードからのクロスリークの影響は、水素中の100ppmの窒素よりも大きい。
CO	1-5 ppm	×	○	○	—	×	COのままでは濃縮せず、COが酸化されて生成したCO ₂ が濃縮する。
H ₂ S	1,10ppm	×	○	—	—	○	触媒Ptへ吸着・蓄積が進行する間はガス中では濃縮しないが、吸着・蓄積が進行しなくなった後（性能の低下レベルとしては許容できない）は濃縮する。
NH ₃	5-23.3 ppm	×	—	—	○	○	触媒上での吸着・反応、膜への溶解やクロスリークの可能性がある。カソード側でもNH ₄ ⁺ を検出。

・ 加速試験条件の検討

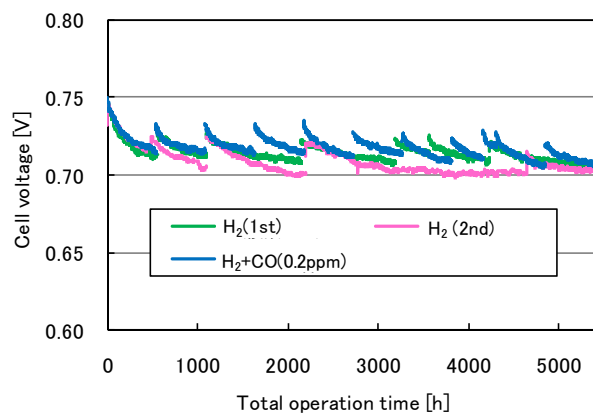
<目的>

不純物による性能低下の短時間での加速試験方法を検討する。

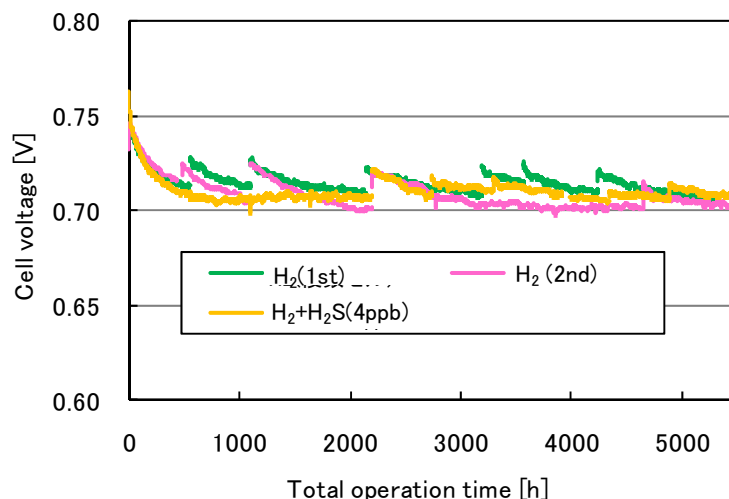
<方法>

不純物導入試験に用いるセルの前処理として、高純度水素 249mL/min(U_f=70%)、空気 1037mL/min (U_a=40%)、電流密度 1000mA/cm² の条件で、セル電圧変化がΔV<2mV/h となるまで発電を行った。前処理終了後、各運転条件における慣らし運転として、不純物を添加するときの電流密度において水素利用率・空気利用率を一定としてセル電圧が安定するまで発電を行った。以上の前処理、慣らし運転終了後、燃料に不純物 (NH₃=10ppm) を添加した水素に切り替え、セル電圧の変化を測定した。

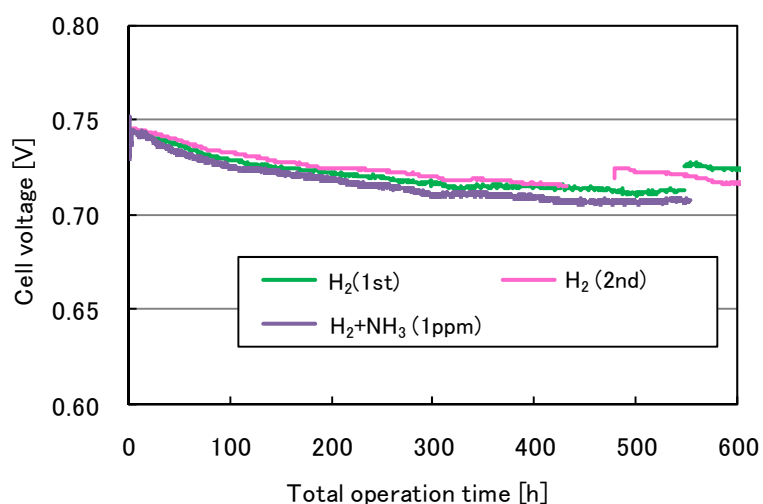
<結果>



H₂+CO(0.2ppm)での 5000 時間影響評価 (0.4mgPt/cm²、250mA/cm²)



H₂+H₂S(4ppb)での 5000 時間影響評価 (0.4mgPt/cm²、250mA/cm²)



H₂+NH₃(1ppm)での 500 時間影響評価 (0.4mgPt/cm²、250mA/cm²)

水素中の不純物が単セルの発電性能に及ぼす影響について、長時間発電による影響評価を行った。CO については、ISO/TC197/WG12 (水素燃料仕様) の技術仕様書 TS14687-2 の許容濃度 0.2 ppm で 5000 時間評価した結果、明確な性能低下がみられなかった。H₂S については、セルへの H₂S の供給総量がある一定値 (10 μmol) に到達するまでは、濃度にかかわらず性能低下量が決まることを明らかにした。また TS の許容濃度 4 ppb で 5000 時間評価した結果、明確な性能低下が見られなかった。NH₃ については、NH₃ 濃度を TS の 10 倍である 1.0 ppm として 500 時間試験を行った。すなわち、TS で定められた NH₃ 濃度 0.1 ppm で 5000 時間試験を行った時と同じ供給量とした。その結果 NH₃ による電圧への影響はほとんど見られないことを確認した。そのことから CO、H₂S、および NH₃ が TS で定められた濃度で 5000 時間供給されても、燃料電池の発電性能に対する影響はほぼないものと想定される。

・混合不純物の影響調査

<目的>

これまでに CO、H₂S、NH₃ などの不純物ごとに燃料電池の発電性能に及ぼす影響を調査し、得られた結果を品質規格における不純物の許容濃度の設定のための議論に提供してきた。しかし、実際の水素燃料中には不純物が複数含まれていることが想定される。不純物が単独でセル内に供給された場合と、複数の不純物が同時に供給された場合とでは、不純物によるセル電圧の低下に及ぼす影響が異なる可能性がある。

<方法>

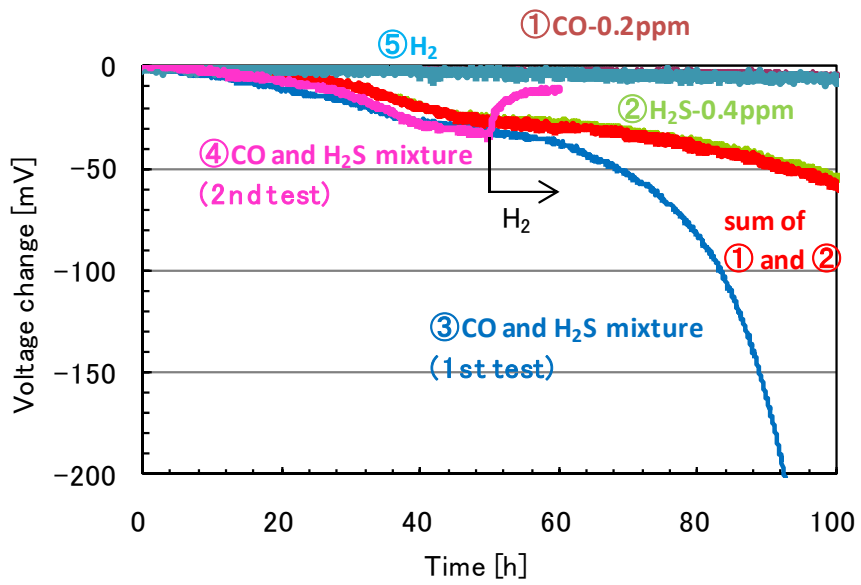
水素燃料中に不純物を複数添加した場合の影響を調査した。水素燃料中に CO、H₂S、NH₃ のうち 2 種類の不純物を同時に添加して発電試験を実施し、単一不純物を添加した場合の性能低下と比較した。

<結果>

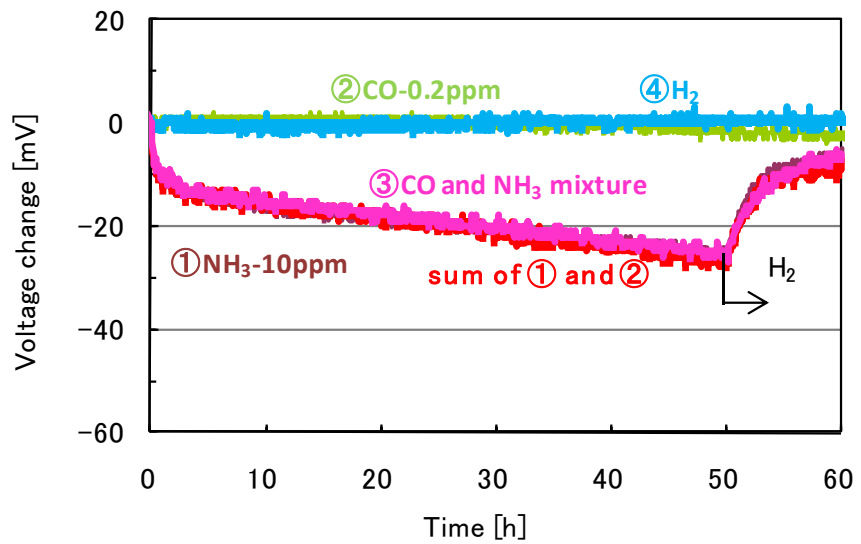
NH₃ と H₂S を混合した試験では、H₂S 濃度を 0.4 ppm、NH₃ 濃度を 10 ppm として発電試験を行った。この時の電圧低下量は、各不純物を単独で添加したときの和で表されることが分かった。今回の条件では NH₃、H₂S 濃度がともに TS で定められた濃度の 100 倍であり、試験時間は燃料電池自動車の耐久性の目安である 5000 時間の 1/100 (50 時間) とした。このことから、H₂S および NH₃ 濃度が TS で定められた範囲内であれば、各不純物を単独で添加したときの和となると考えられる。

CO と NH₃ を混合した試験では、CO 濃度を 0.2 ppm、NH₃ 濃度を 10 ppm として発電試験を行った。この時の電圧低下量も H₂S、NH₃ を同時に添加したときと同様に、各不純物を単独で添加したときの和で表されることが分かった。CO によるセル電圧への影響は濃度で整理できることがわかっており、今回の試験での NH₃ 濃度は TS で定められた濃度の 100 倍として、50 時間試験を行った。このことから、NH₃ と CO を混合したことによる大きな電圧低下は起こらないと考えられる。

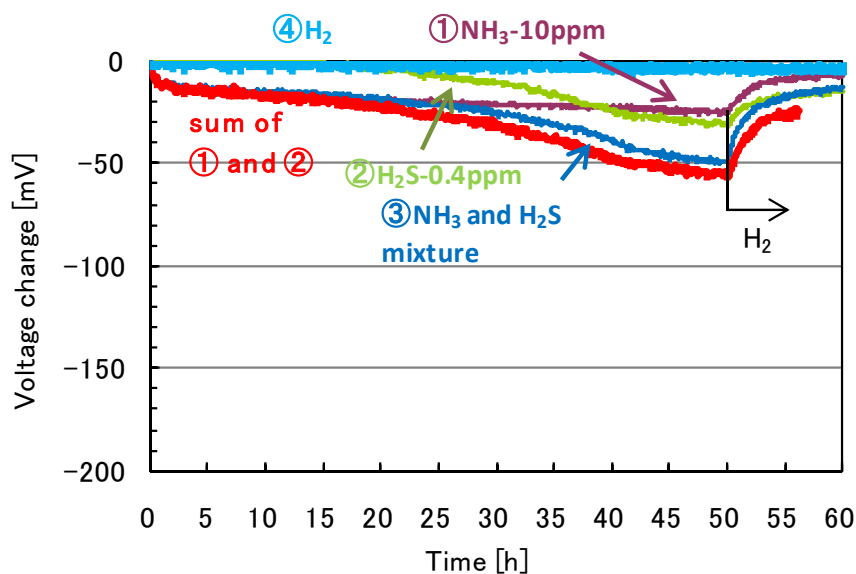
CO と H₂S を同時に添加した試験では、H₂S 濃度を 0.2~0.8 ppm の間で変化させ、CO 濃度 0.2 ppm の条件でのセル電圧の挙動を調査した。この結果、電圧低下量は CO と H₂S が共存している場合でも H₂S を単独で添加したときと同様に、H₂S の供給量で整理できることがわかった。



セル電圧低下量の時間変化(CO+H₂S)



セル電圧低下量の時間変化(CO+NH₃)



セル電圧低下量の時間変化 (H₂S+NH₃)

水素燃料中の代表的な不純物の影響まとめ

○:あり, ×:なし





不純物	CO	H ₂ S	NH ₃
発電性能への影響	電圧は低下するが比較的短時間で安定する。電圧低下は可逆的である。	電圧は低下し続け、供給量が一定値を超えると低下速度が大きくなる。電圧低下は不可逆である。	電圧は低下し続け、低下速度に大きな変化はない。電圧回復に時間を要する。
推定されるメカニズム	短時間で触媒Ptへの吸着が飽和する。純水素や運転パターンによる電位変動によって脱離する。	触媒Ptへの吸着・蓄積が進行する。純水素や運転パターンによる電位変動によって一部脱離する。	溶解、物質変化してカソードにも影響する。
濃度依存性	○	○	○
試験時間(供給量)依存性	×	○	○
循環燃料中での濃縮の有無	× (CO ₂ が濃縮)	× ^{注)} (触媒Ptに蓄積)	× (水溶性あり)
アノード担持量の影響	○	○	×
電圧低下への混合の影響	TSあるいはDIS一次案レベルの許容濃度では単独での低下量の和になる		
許容濃度の設定について	MEAのアノードPt担持量(触媒表面積)の影響を考慮する必要がある	MEAのアノードPt担持量(触媒表面積)とFCVの総走行距離・燃費を考慮する必要がある	FCVの総走行距離・燃費を考慮する必要がある
その他必要な検討	温度・湿度などの影響など	温度・湿度などの影響など	温度・湿度などの影響 カソードPt担持量の影響など

注) 許容できる性能低下レベルまでの供給量における濃縮の有無を示した

・付臭剤の適用性評価

現在のところ水素の漏洩に関しては、嗅覚により感知することは法的には求められていない（車両では水素センサによる検知が代用として認められている）が、水素が一般に普及した場合を想定すると、安全性確保の観点から都市ガス、LPG 相当の漏洩検知方法が必要であり、付臭剤添加は有力な手段の一つである。

燃料電池自動車用水素付臭剤の候補化合物

付臭剤候補化合物		推定基準 濃度 ^{a)} / ppm	発電性能への影響 ^{b)}		充填 可能圧 ^{c)} / MPa	臭質	課題
化合物 (略称)	構造		推定基準 濃度	推定基準 濃度以上			
5-ethylidene- 2-norbornene (5E2NB)		17	○	△	34	石炭ガス臭	・高添加濃度での発電性能低下 ・充填可能圧がやや低い
2,3-butanedione (23BD)		5.0	○	△	> 70	バターの 腐敗臭	・高添加濃度での発電性能低下 →Pt-Ru触媒, エアブリード有効
ethyl isobutyrate (EIB)		2.2	○	△	> 70	フルーツ臭	・高添加濃度での発電性能低下 →Pt-Ru触媒, エアブリード有効
5-ethyl-3-hydroxy-4- methyl-2(5H)-furanone (ethylsugarlactone:ESL)		1.0×10^{-4}	○	○	> 70	キャラメル臭	・臭質

- a) 検知閾値の10⁵倍で定義した濃度で、水素用付臭剤として使用される場合に必要となる添加濃度の推定値。
 b) ○:電圧低下なし, △:電圧低下するが濃度を下げると回復 (両電極ともPt触媒)
 c) 推定基準濃度で添加する場合に、凝縮させずに充填できる充填圧。

<目的>

当研究所で選定してきた4種の燃料電池自動車用水素付臭剤候補化合物(5E2NB、23BD、EIB、ESL)について、より実用的な観点から燃料電池自動車用水素付臭剤としての適用性の評価を進めた。

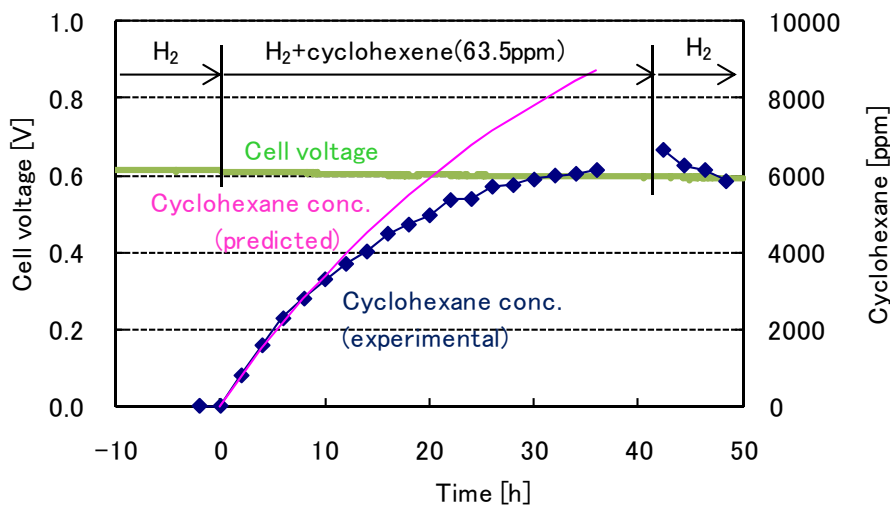
<方法>

水素循環系での濃縮挙動を燃料循環系を備えた単セル試験装置で調査した。

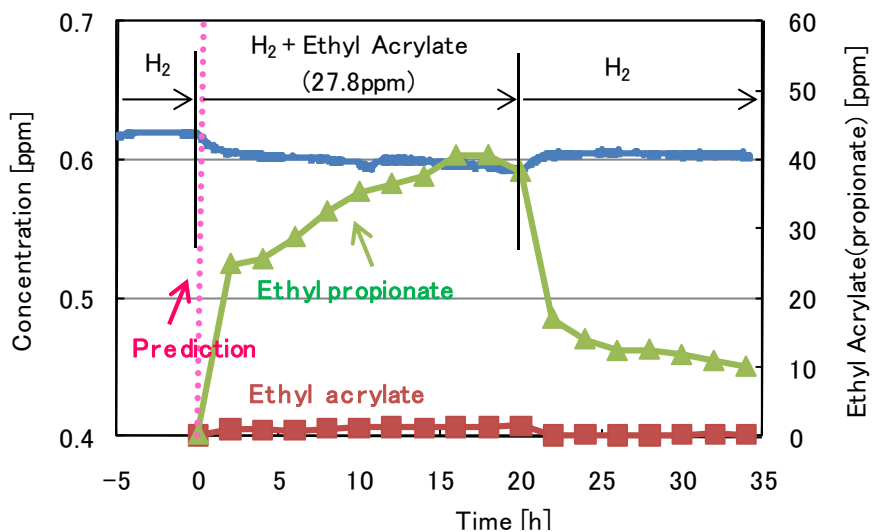
<結果>

当研究所で選定してきた4成分については、各付臭剤候補化合物の推定基準濃度（検知閾値の105倍）で添加した場合には、100時間の運転を実施した場合でも顕著な性能低下は見られないことが確認できた。また水素循環系での濃縮挙動評価の結果、EIBや23BDなどの含酸素化合物では顕著な濃縮は見られず、燃料電池性能への影響は軽微であることがわかった。炭化水素である5E2NBの場合には、5E2NBの水素化物が濃縮するものの、数千ppmでも燃料電池性能への影響は見られないことがわかった。また、EIBや23BDは、万が一濃縮した場合でも、エアブリードやPt-Ru触媒により濃縮時の被毒を軽減できることがわかった。ガス協会からの提案成分であるシクロヘキセンについては、臭気強度がやや弱いことから添加濃度が高くなり、充填可能圧が低くなるという課題があるが、燃料電池性能への影響は観察されなかった。トヨタ自動車らの研究グループでの提案成分についてはアクリル酸メチルとアクリル酸エチルについて燃料電池性能への

影響を評価した。アクリル酸メチルは推定基準濃度での燃料電池性能への影響が大きく、アクリル酸エチルの場合でも約4%の性能低下が観察された。またアクリル酸エチルは燃料電池へ供給する前の段階で一部水素化しているなど、化合物としてやや不安定であった。これらの結果から、燃料電池自動車用水素付臭剤への適用性の高い成分として選定した5成分とその特性をまとめた。いずれの成分も万能というわけではなく、一長一短がある。炭化水素系の5E2NBやシクロヘキセンの場合には、臭気強度が弱かったり充填可能圧がやや低いという課題がある。一方含酸素有機化合物の23BDやEIB、ESLの場合には、臭質や水溶性（土壌透過性）に課題がある。本事業では、主に燃料電池性能への影響という観点から付臭剤候補化合物の影響を評価し、適用性の高い成分を選定してきた。燃料電池自動車用水素付臭剤の実用化に当たっては、車載の高圧水素用器や水素配管材料への影響評価、水素充填時の冷却環境下での充填可能圧の確保、水素パーージ時の脱臭技術の開発などの課題についての取り組みが今後必要になると考えられる。



水素循環系でのシクロヘキセンの濃度変化



水素循環系でのアクリル酸エチルの濃度変化

表 3.3-1 燃料電池自動車用水素付臭剂候補化合物の適用性まとめ

付臭剂候補化合物 化合物名 (略称)	分子構造	臭気強度 [ppm]			臭質	推定基準温度 での燃料電池 性能への影響	水素循環系での 濃縮挙動	充填 可能圧 MPa	高压下で の化学的 安定性	水溶性 (土壌透過性)
		検知閾値	認知閾値	推定基準濃度						
5-ethylidene-2-norbornene (5E2NB)		0.00017	0.0026	17	石炭ガス臭	影響なし	水素化合物が濃縮するが燃料電池性能には影響なし。	34	-	0.0089g/L (@25°C)
Cyclohexene		-	0.0615	615	石油臭	影響なし	水素化合物が濃縮するが燃料電池性能には影響なし。	14	-	0.317g/L (@20°C)
2,3-butanedione (23BD)		0.00005	-	5	バターの腐敗臭	影響なし	濃縮せず。燃料電池性能への影響なし。	>70	35MPaでは変化なし。	200g/L (@15°C)
Ethyl isobutyrate (EIB)		0.000022	0.0061	2.2	フルーツ臭	影響なし	濃縮せず。燃料電池性能への影響なし。	>70	-	3.17g/L (@15°C)
5-ethyl-3-hydroxy-4-methyl-2(5H)-furanone (ethylsugarlactone:ESL)		1 × 10 ⁻⁹	6.3 × 10 ⁻⁸	1 × 10 ⁻⁴	キャラメル臭	影響なし	濃縮せず。燃料電池性能への影響なし。	>70	-	-
Ethyl acrylate		0.00026	0.0005	26	シンナー臭	軽微な影響 (純水素供給で回復)	水素化合物に変化する。燃料電池性能に影響あり。	>70	-	15g/L (@20°C)

- : データなし

■ : 付臭剂への適用性を満たしていないと考えられる項目

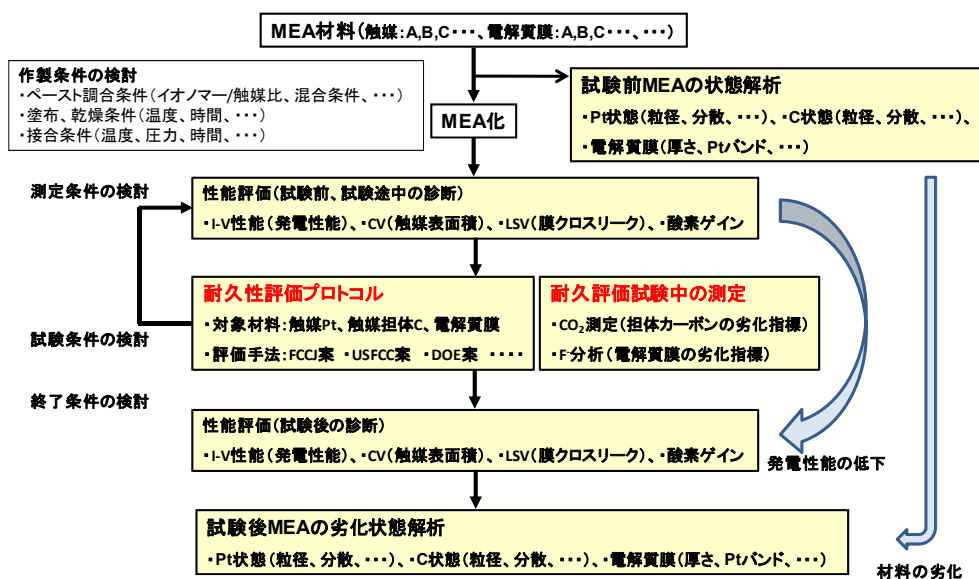
(ウ) MEA 耐久性評価法

<目的>

燃料電池材料の性能や耐久性は MEA の状態で評価することが重要であるので、FCCJ (Fuel Cell Commercialization Conference of Japan)、USFCC (US Fuel Cell Council)、DOE (Department of Energy) などから、MEA 耐久評価法が提案されている。これらのプロトコルは、触媒や電解質膜などの MEA 材料の耐久性を評価するという同じ目的の評価プロトコルであるが、それぞれ異なった評価条件が指定されている。そこで、提案されている MEA 耐久評価法の検証し、テストプロトコルの基本案を作成する。

<方法>

JARI で MEA 材料を入手して作製した MEA と JARI 標準セルを用いてこれらプロトコルで MEA の耐久性評価を行い、性能の低下挙動や実際の材料の劣化状態を比較した。

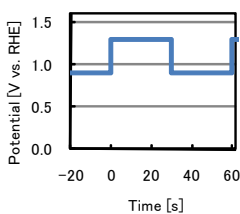
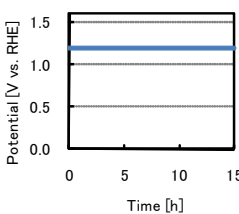
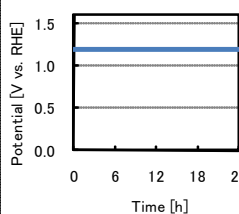


本研究で行った評価の流れ

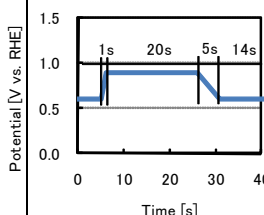
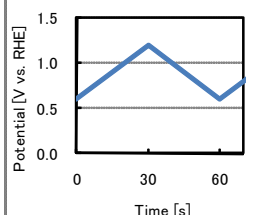
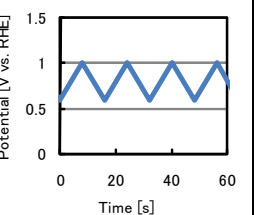
電解質膜耐久性(OCV)試験の各プロトコル

OCV (membrane)	FCCJ	USFCC		DOE
試験条件				
温度	90°C	←		←
相対湿度	30%RH	←		←
ガス種 (anode / cathode)	H ₂ /Air	H ₂ /O ₂	H ₂ / 40%O ₂	H ₂ /Air
流量	829/829 mL/min	240/250 mL/min	240/250 mL/min	350/829 mL/min (stoics of 10/10 @ 200mA/cm ²)
入口圧力	Atmospheric	Atmospheric		Anode250, Cathode200 kPa (inlet)
診断	F ⁻ release(24h), Hydrogen crossover, OCV, IV, (and high-frequency resistance)			
試験時間	500hr	250hr → 200hr		200hr → 500hr

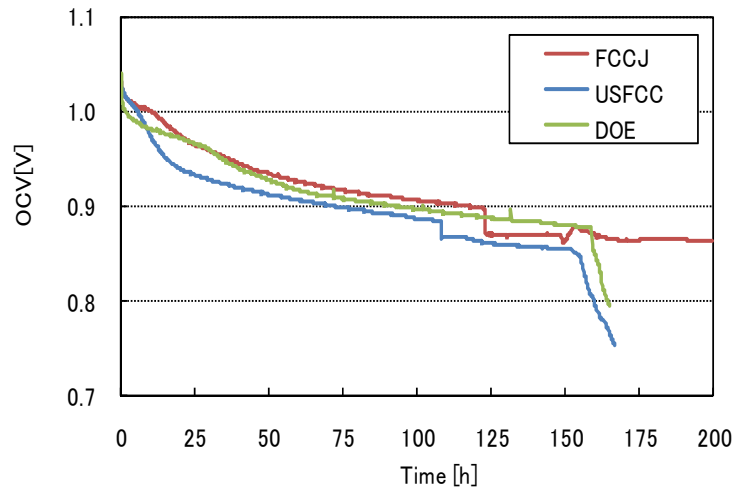
起動停止プロトコルの比較

担体腐食 (Carbon corrosion)	FCCJ	USFCC (Protocol 1)	DOE
試験条件:			
温度	80°C	80°C	80°C
相対湿度	95%RH	100%RH	100%RH
ガス種 (anode / cathode)	H ₂ /N ₂	←	←
電位	1.3V (30s)-0.9V (30s) 	1.2V hold (15h) 	1.2V hold (24h) 
圧力	(atmospheric pressure)	50kPaG outlet	50kPaG outlet
試験終了	-	100h or 10% peak load loss	400h
診断	CO ₂ release, I-V and ECA		

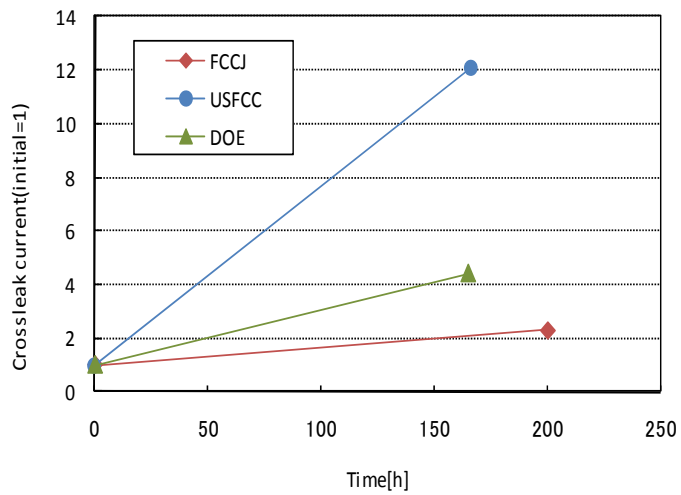
FCCJ、USFCC および DOE の負荷変動プロトコルの比較

負荷変動 (Catalyst stability)	FCCJ	USFCC (Protocol 2)	DOE
試験条件:			
温度	80°C	←	←
相対湿度	95%RH	100%RH	←
ガス種 (anode / cathode)	H ₂ / N ₂	H ₂ / N ₂	H ₂ / N ₂
電位	0.9V - 0.6V 40s = 1 cycle 	linear sweep 1.2-0.6(20mV/s) 60s = 1 cycle 	linear sweep 0.6-1.0(50mV/s) 16s = 1 cycle 
圧力	(atmospheric pressure)	50kPaG outlet	(atmospheric pressure)
試験終了		30000cycle (500h) or 50% loss in ECA	30000cycle
診断	I-V and ECA		

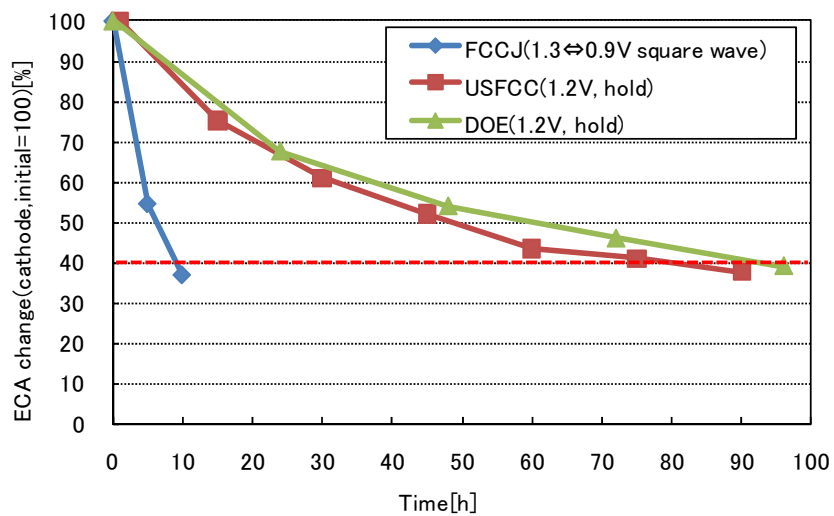
<結果>



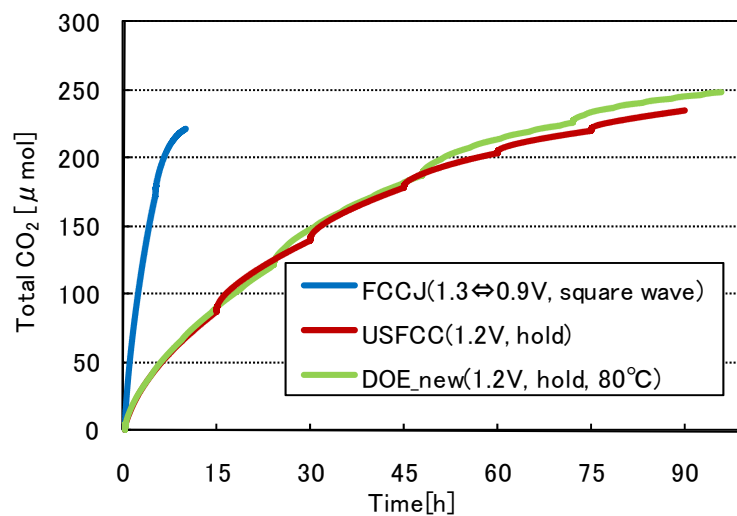
OCV の変化



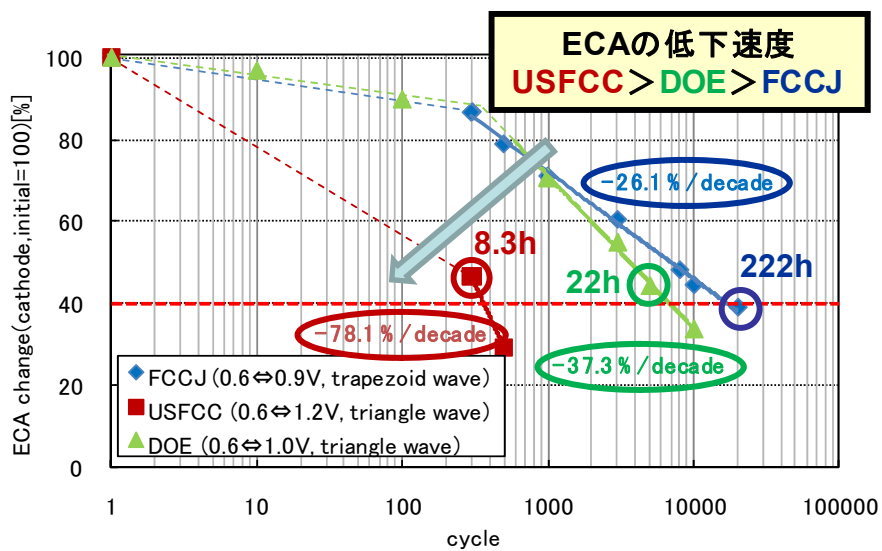
OCV 試験によるクロスリーク電流の変化



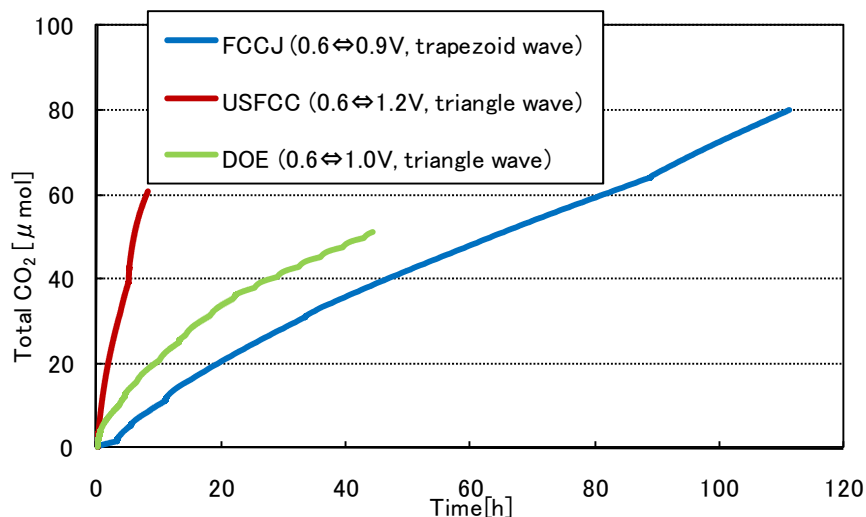
担体腐食試験(起動停止試験)におけるECA の変化



担体腐食試験(起動停止試験)における CO₂ の発生量



Pt 安定性試験(負荷変動試験)による ECA の変化



負荷変動試験中の CO₂ の発生量

JARI で市販の MEA 材料を入手して作製した MEA と JARI 標準セルを用いてこれらプロトコルで MEA の耐久性の評価を行い、性能の低下挙動や実際の材料の劣化状態を比較した。

耐久評価プロトコル間のわずかな試験条件の差が MEA の性能低下や劣化状態の差に及ぼす影響を調査するためには、再現性や信頼性の高い MEA を適用する必要があると考えた。そこで、MEA の作製条件の検討から研究を開始した。特に、触媒と電解質イオノマーの配合比や混合方法など、触媒ペーストの作製条件が発電性能の安定性に及ぼす影響を調査し、電流密度 1000mA/cm² の高い電流密度で 100 時間以上安定した発電が可能な MEA を用意した。また、MEA の発電性能や耐久性は使用する単セルによっても異なってくるので、セルについてはこれまでに他の研究機関とのクロスチェックなどでも信頼性が確認されている JARI 標準セルを使用した。

耐久評価試験については、試験終了の判断項目や基準、途中診断のタイミングや条件もプロトコル間で統一されていなかったり指定されていなかった。プロトコル間での性能低下や劣化状態を比較するためには、統一された基準や条件が必要と考え、途中診断や終了の判断基準についても検討した。診断として実施する CV 測定、LSV 測定の条件が測定結果に及ぼす影響を調査し、各プロトコルによるすべての診断を同一条件で実施した。これにより各プロトコルでの評価結果を条件を揃えて比較することが可能になった。

耐久評価試験の結果については、触媒担体の劣化加速試験では CO₂ の発生や触媒層の多孔構造の潰れ、触媒 Pt の劣化加速試験では Pt 粒子径の増大、電解質膜の劣化加速試験では電解質膜の薄膜化などの現象が観察された。しかし、評価に必要な試験時間や材料の劣化挙動に関しては各プロトコルで多少の差があることがわかった。

以上から、今後の試験方法の共通化に向けた有意義な基礎データを提供したが、評価プロトコルの協調と統一化のためにはさらに多くの材料を評価することでプロトコルの適用性の検証を進める必要がある。

今回の評価試験の結果、評価法としての基本的な手法として以下のように考えている。

- MEA化 ……………作製条件(触媒層組成 etc)の検討
連続運転での発電安定性の調査
作製ロット間での性能ばらつきの調査
- 初期診断……………IV(発電性能), CV(触媒表面積), LSV(クロスリーク量), 酸素ゲイン
- 初期状態解析……SEM(触媒層厚さ, 電解質膜厚さ)
TEM(担体空隙構造, Pt分散状態・粒径
MEAのロット, セル内の位置によるばらつき・違い
- 耐久評価試験……電位変動試験(発生CO₂量の測定), OCV試験(放出F₂量の測定)
- 途中診断(電位サイクル試験のみ)
…… IV(発電性能), CV(触媒表面積), LSV(クロスリーク量)
酸素ゲイン(終了時のみ)
- 劣化状態解析……SEM(触媒層厚さ, 電解質膜厚さ)
TEM(担体空隙構造, Pt分散状態・粒径
MEAのロット, セル内の位置によるばらつき・違い

耐久性評価試験法の基本フロー

(ウ) スタック、システム、車両性能評価試験方法

a) 燃料電池自動車性能試験法の検討

- ・燃料電池自動車の燃費計測手法 流量法の開発

<目的>

燃料電池自動車の燃費試験法案は2002年10月にISO/TC22/SC21(電気自動車)/WG2へ提出され、2004年12月には新規作業項目提案(New Work Item Proposal: NWIP)として承認された。しかし、水素流量計を用いた計測手法である流量法は試験車両によって誤差が大きくなることが判明し、「normative(規定)」もしくは「informative(参考)」とすべきか検証データが求められてきた。そこで流量法の高精度化を進め、国際規格案の裏付けとなるデータを提供する。

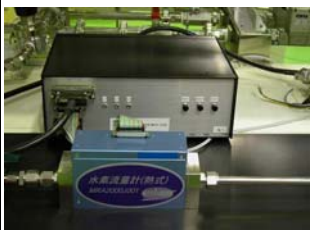


<方法>

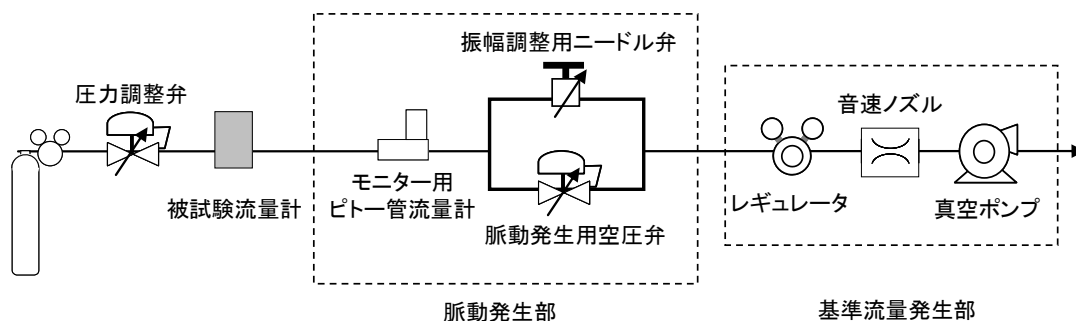
これまでの試験結果を解析した結果、燃料流量の脈動が誤差要因となっている可能性が高いことがわかった。そこで脈動条件下でも高精度が期待できる高応答・高分解能の水素流量計を開発するとともに、誤差低減策検討のために脈動振幅や周波数を可変とする評価装置を試作し、水素流量計への影響や脈動減衰器の特性を調査した。得られた知見をもとに測定系を構築し、実際に燃料流量波形に脈動を有する燃料電池自動車を用いて燃費試験を実施し、対策効果を確認した。

<結果>

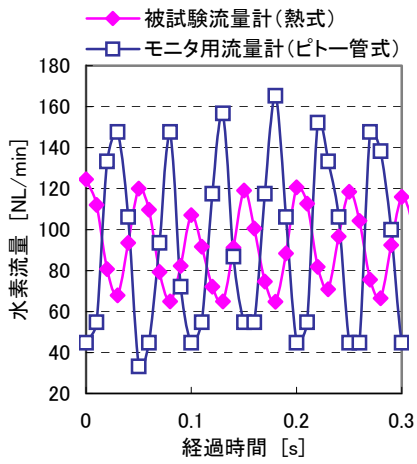
2005年度に、熱式、超音波式、差圧式の3種類の水素流量計を開発し、燃費試験に使用できる目処を得た。2006年度には、これらの流量計について脈動振幅や周波数の影響、種々の脈動減衰器の特性について調査した。その結果、脈動振幅が大きい場合に誤差が増大すること、バッファやレギュレータ等により脈動振幅を減衰させることが精度維持に効果的であることがわかった。国内外の燃料電池自動車6車種について燃費試験を実施した結果、全ての車両、種々の試験モードにおいて質量法に対する相対誤差は±1%以下となり、質量法や圧力法と同様に安定して計測可能なことを実証した。国際規格案の裏付けとなるデータをタイムリーに取得し、流量法が「normative (規定)」として国際規格ISO23828に盛り込まれることに寄与した。

燃料電池自動車燃費試験用に開発した水素流量計

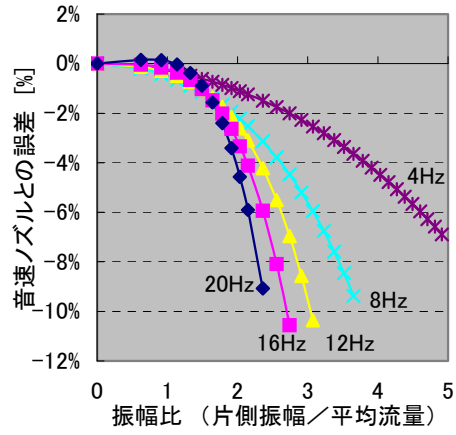
Type	Thermal	Ultrasonic	Diff. pressure
Range	0-2000 NL/min	0-900 NL/min	0-1500 NL/min
Accuracy	±1 %RD (8-2000 NL/min)	±1 %RD (13-900 NL/min)	±1 %RD (10-1500 NL/min)
Sampling rate	5 ms	20 ms	20 ms
Pressure drop	≤50 kPa (@2000 NL/min)	≤25 kPa (@900 NL/min)	≤20 kPa (@1500 NL/min)
Pressure range	0-1 MPaG (cap. 1.5 MPaG)	0-1 MPaG (cap. 1.5 MPaG)	0.5-1 MPaG (cap. 1.5 MPaG)
Photo			
Note	Three sensor equipped #1: 0-20 NL/min #2: 20-200 NL/min #3: 200-2000 NL/min	Small pipe(φ5.7mm) configuration and axial sensor design	Two sensor equipped #1: 0-100 NL/min(1kPa FS) #2: 100-1500 NL/min (20kPa FS)



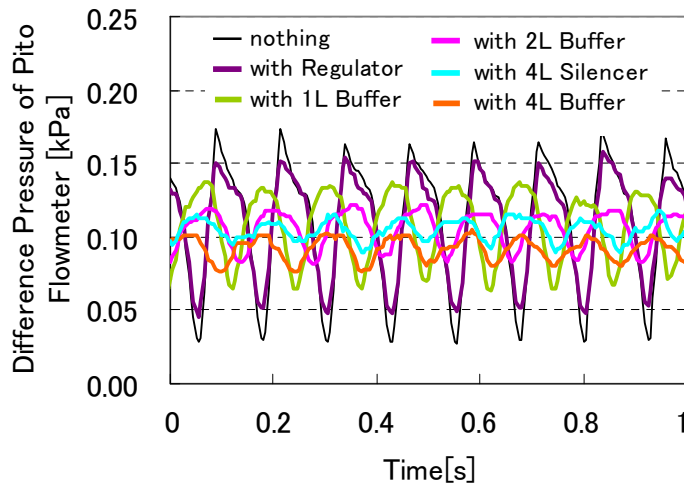
脈動影響評価装置の概念図



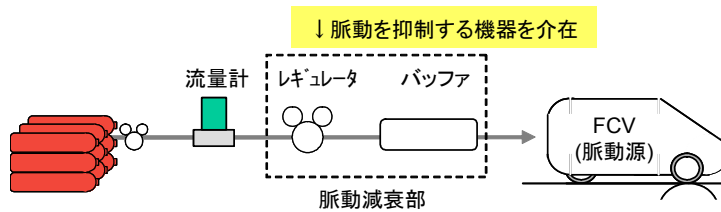
熱式流量計の脈動波形



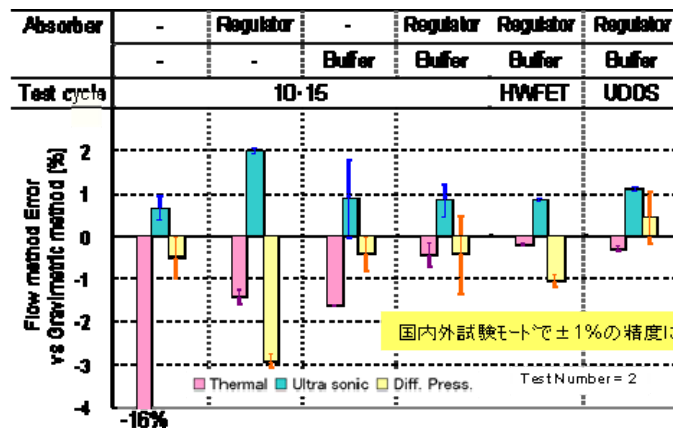
熱式流量計の脈動影響



脈動減衰器による脈動抑制効果



脈動抑制による流量法の精度検証試験レイアウト



バッファ、レギュレータの有無による各種流量計を用いた流量法精度検証結果

- ・ 車両改造不要な燃費計測手法の開発

<目的>

ISO にて標準化を進めている燃料電池自動車の燃費計測手法（質量法、圧力法、流量法）は、燃料となる水素を車外から供給するために試験車両の燃料配管や安全装置に改造が必要となる。このため、内燃機関自動車のカーボンバランス法のように排気組成から燃費を算出できる計測手法が望まれている。そこで、ISO への追加提案に向けて、車両改造不要な燃費計測手法を開発する。

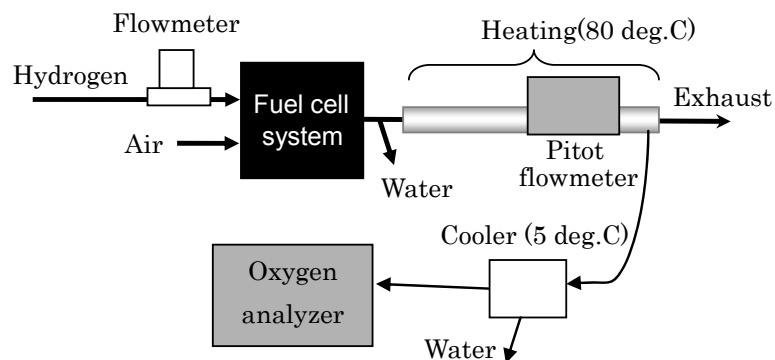
<方法>

排気組成から燃費を算出・補正する手法として酸素バランス法と電流法を検討した。2005年度は計測理論を構築し、試験機器を一部導入した。酸素バランス法は直接連続測定法（モーダルマス法）をベースとしており、排出ガス濃度と排出ガス流量の計測が基幹技術となる。2006年度は計測機器の改良と高精度化・簡便化のための演算手法の検討を進めた。2007年度は燃料電池自動車や燃料電池システムを用いて計測精度や実機への適用性の確認、課題抽出を進めた。

<結果>

酸素バランス法では、国内外の燃料電池自動車 4 車種を用いて台上燃費試験を実施した結果、試験車両や試験モード、演算手法により燃費値に誤差・ばらつきがみられ、特に吸気流量を直接計測した場合に大きな誤差を生じた。燃料電池システムの燃費試験から要因を検証した結果、計測方法や演算手法が結果に大きく影響を及ぼすこと、計測系の配管容量の低減、流量計とガス分析計の計測位置の近接化、分析むだ時間の補正等により計測精度が向上することがわかった。課題は残されているものの、計測方法や演算手法の改良により精度を向上できることを明らかにし、その可能性を示した。電流法に

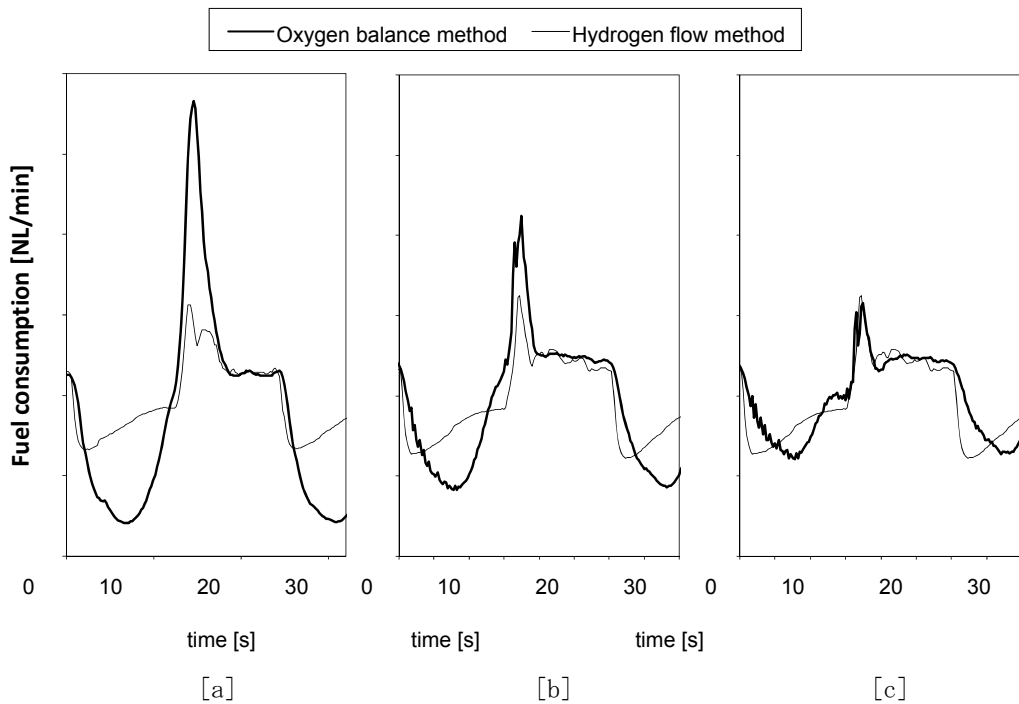
関しては試験車両や試験モードにより誤差・ばらつきがみられ、質量法に対し少ない燃費値となった。計測誤差の要因としては、電流計、排気流量計ならびに水素分析計などの各計測機器の誤差に加え、直接計測することができない燃料電池内部のクロスリーク、外部リークなどの水素消費が考えられる。また、車両改造を避ける観点から電流計測では車載センサを使用した。センサの精度やデータ出力の仕様は試験車両でさまざまであり、実用化に向けては課題があることが明らかとなった。



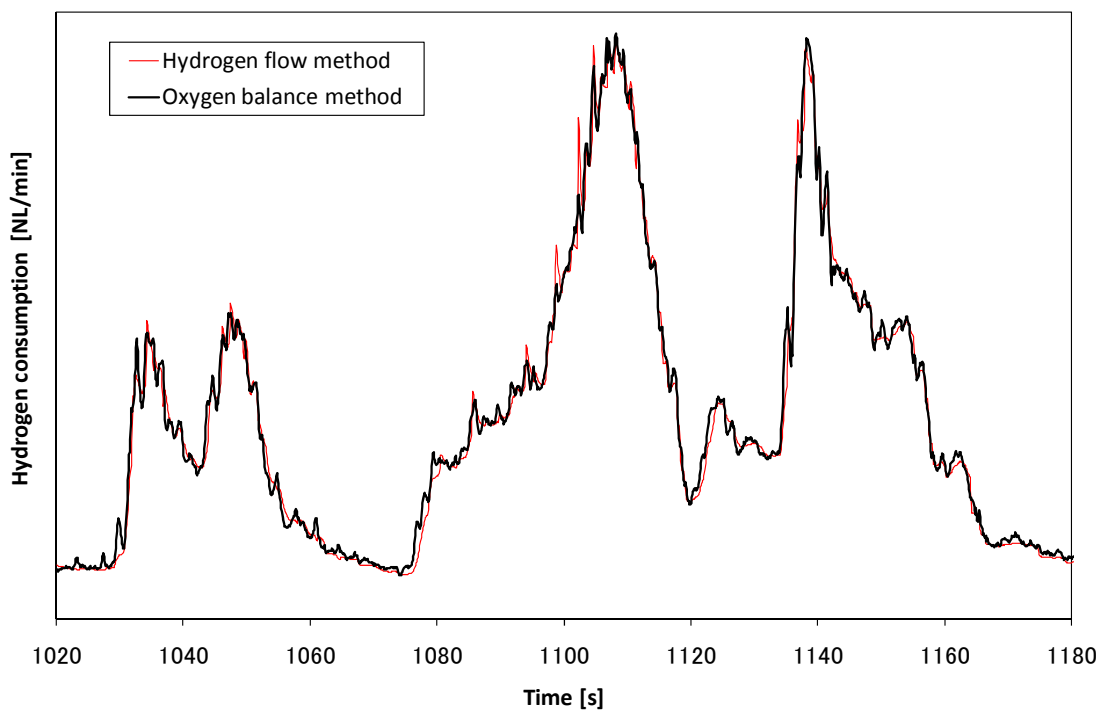
酸素バランス法の試験レイアウト



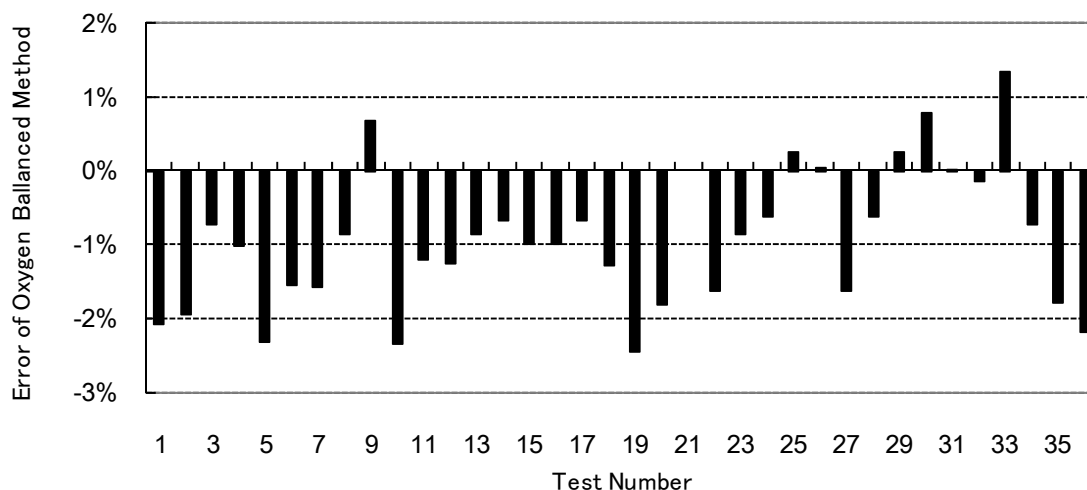
酸素バランス法の計測部



[a] 排気管容量大(9L)、[b] 排気管容量小(3L)、
 [c] 排気管容量小(3L)かつ酸素濃度の時間補正
 燃料電池システムの燃料消費量計測における酸素バランス法の改良効果確認



改良した酸素バランス法による燃料電池システムの燃料消費量計測
 (JC08 モード)



改良した酸素バランス法による燃料電池システムの燃料消費量計測
(JC08 モード)

b) 燃料電池システム、燃料電池スタック性能試験法の検討

<目的>

燃料電池スタックや燃料電池システムについて評価試験を行い、試験法検討のためのデータを蓄積する。

<結果>

燃料電池自動車の燃費計測手法の開発において、燃料電池システム台上試験を実施して流量法、酸素バランス法、電流法の開発を進めた。また、燃料電池システム単体の試験法として、負荷追従性や起動・停止特性などの過渡性能を検討可能なよう試験装置を構築した。

③ 基準・標準化活動

(ア) FCV にかかる標準化

a. 国内での基準・標準化活動、および b. 海外での基準・標準化活動として、FCV 基盤整備委員会で構成される、解析・技術部門の各 WG での技術審議と共に、標準化部門の各 WG において活動範囲毎に活動方針の審議、ドラフト作成およびコメント作成を行い、国際会議への対応を行った。

a) ISO/TC22/SC21 (電動車両)

ISO/TC22/SC21 (電動車両) に関しては、年 2 回の国際会議に出席し、用語、安全、性能試験法のドラフト審議に日本の意見を反映させた。SC21/WG1 (安全) に関しては FCV の安全規格について、日本がドラフトを作成し審議の結果、2006 年に ISO23273 として発行した。それに引き続き ISO 6469 (電気自動車の安全仕様) 改正が行われている。これは、従来のバッテリー電気自動車 (BEV) に加えて FCV、HEV (Hybrid Electric Vehicle) を加えるもので、これも日本がドラフトを作成し、パート 1 (電池安全) 及び 2 (運転・操作安全) は、2009 年 9 月に発行された。現在、パート 3 (電気安全) が、DIS 投票を終えたところである。

日本が幹事国を務める SC21/WG2 (電動車両の燃費・走行性能) に関しては、ISO 23828 (FCV 燃費測定法) の中に、本事業の成果である圧力、質量、及び電流法の水素測定法が記載され、2008 年に発行された。

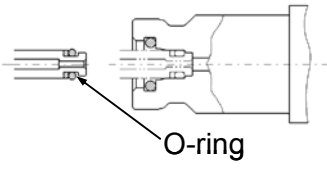
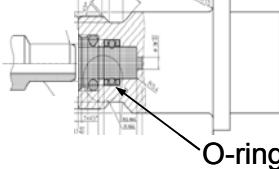
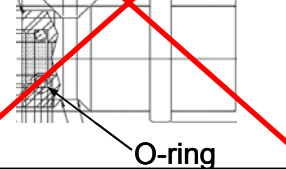
用語に関しては、ISO/TC22/SC21 (電動車両) に用いられている用語集を TR (Technical report) にまとめる作業が行われているが、本件は 2010 年 10 月開催の国際会議で最終的にまとめ、その後、SC21 内での投票を行い、ISO/TR8713 として発行する予定。

b) ISO/TC197 (水素技術)

<ISO/TC197/WG5 (水素充填コネクタ) >

2006 年 6 月に発行された 35MPa 仕様の水素充填コネクタ規格の改正作業として、70MPa 仕様の水素充填コネクタ規格審議に移行した。70MPa 仕様の実質審議は米国 SAE の場で行われ、従来は、独 2 社 (B 社・C 社) の提案が先行していたが、日本も独自提案 (A 社) を行い、詳細な技術データを開示することにより受理された。その結果、日独 3 社の競合審議となったが、2007 年 3 月の投票にて独 1 社提案 (C 社) が排除された。最終的には、日本提案 (A 社) と独 1 社提案 (B 社) について日 (JHFC) ・米で比較実証試験を行い、2009 年を目処に最終選考することで合意された。2009 年 9 月バンクーバー会議において、日本提案が採用され DIS17268 として投票に付されたものの、独提案 (B 社) の実績を有する欧米自動車業界の合意が得られず否決となった。本件の打開策として、TC197 事務局主導で関係者によるワークショップを開催し、合意形成を図る模様。

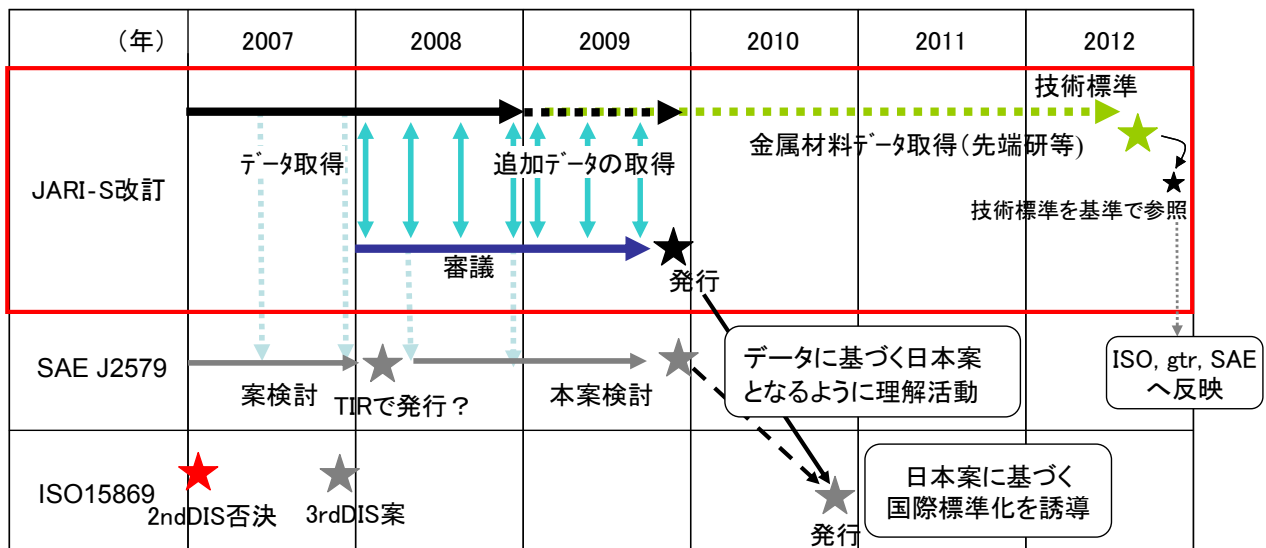
70MPa 仕様として提案されたレセプタクル構造

Seal on Nozzle	Dual Seal	Single Seal
A 社(日本)	B 社(ドイツ)	C 社(ドイツ)
 <p>O-ring</p>	 <p>O-ring</p>	<div style="border: 2px solid red; width: 100%; height: 100%; position: relative;">  <p>O-ring</p> </div>
		2007年3月に排除

< ISO/TC197/WG6 (高圧水素容器) >

TC197 事務局から 2nd DIS (DIS15869.2) が回付され、2006 年 11 月締切で投票に付されたが、日・米・独・英・ノルウェー5 カ国の反対があり否決された。否決結果を受け、TC197 事務局から 2008 年 3 月に 3rd DIS を回付するスケジュール変更が通知され、2008 年 3 月に再度 DIS 投票に付されたが、日本は技術議論のベースとなるデータ取得に時間が必要であり時期尚早と判断し、関係諸国の合意を取り付け否決投票とした。反対投票には TS 化を指向するコメントが多数付されたことから、TC197 事務局は TS 発行プロセスに移行し、2009 年 2 月 1 日付けで TS15869 が発行された。一方、車載容器の国際規格に関しては gtr 議論が先行しており、日本自動車業界としては、国内基準の改訂と gtr 内容を整合させ、将来的に整合のとれた ISO 発行を企図している。以下に ISO/TC197/WG6 の進捗及びスケジュール、併せて国内外基準・標準についての取り組みについて示す。

高圧ガス保安法「容器および附属品の技術基準」の見直し及び国際標準化活動
—スケジュール—



JARI-S: 圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準、圧縮水素自動車燃料装置用附属品の技術基準
 SAE: Society of Automotive Engineers, gtr: global technology regulation
 DIS: Draft International Standard, TS: Technical Specification

<ISO/TC197/WG12 (FCV 用水素燃料仕様) >

2003年10月に、FCV用の燃料に関する日本提案のNWIP (Amendment) が承認され、日本を議長国 (議長：東京都市大学、高木先生) としてが発足。日本提案のベースとなったデータは、2000年度より2004年度までの自動車用固体高分子形燃料電池システム普及基盤整備事業 (ミレニアム事業) にて得られたものである。国際会議における審議により、FCVおよび水素製造プロセスが未だ発展途上の技術であることから導入期の規格を目論み TS (Technical Specification) としてプロジェクトを立ち上げ、投票の結果承認され、ISO/TS14687-2 として、2008年3月に発行された。

その後2回の国際WGの審議を経てまとまったCD (Committee Draft) 原案を2009年5月にTC197に提出、2009年8月にCDが2ヶ月回付でコメントの収集された。さらにその後2回の国際会議において、米国からの、CO、H₂Sに関するデータの総括が報告され、JARIにて実施した長時間暴露試験等の結果総括と総合して審議、米国・フランスからのインフラ側のコメントも検討し、DIS原案を策定した。2010年10月にはTC197に提出予定

スケジュールはDIS:2010年10月、FDIS:2011年10月、IS:2012年4月との決議がTC197総会にてなされている。

水素燃料仕様の国際標準化-ISO/TC197 (水素技術) /WG12 (水素燃料仕様)
-スケジュール-

年度	'04	'05	'06	'07	'08	'09	'10
ISO/TC197/WG12 (水素製品仕様)	Hydrogen Fuel – Product Specification Part2:PEM fuel cell applications for road vehicles						
	WD		DTS		TS	CD	DIS FDIS
	不純物の影響評価 単セル試験法 セル性能への影響評価(長時間, 加速試験条件) 水素循環系での不純物濃縮 MEA仕様(Pt担持量)の影響 混合不純物の影響 運転条件の影響 メカニズム, 被毒低減技術						
水素関連技術	水素用付臭剤						

WD: Working Draft, DTS: Draft Technical Specification, TS: Technical Specification, CD: Committee Draft
DIS: Draft International Standard, FDIS: Final Draft International Standard, IS: International Standard

表一 FCV 用水素規格 TS と ISO/DIS14687-2 の比較（下線部が変更点）

特性 (定量分析)	ISO/TS 14687-2 Grade D	ISO/DIS 14687-2 (案) Grade D
水素純度 (最小モル分率) ^a	99.99 %	<u>99.97 %</u>
許容最大不純物組成 (指定ない限り最大モル分率)		
全ガス (Total gases) ^b	100 μmol/mol	<u>300 μmol/mol</u>
水 (H ₂ O)	5 μmol/mol	5 μmol/mol
全炭化水素 (C ₁ 換算) ^c	2 μmol/mol	2 μmol/mol
酸素 (O ₂)	5 μmol/mol	5 μmol/mol
ヘリウム(He)、 窒素 (N ₂)、 アルゴン(Ar)、	100 μmol/mol	<u>ヘリウムのみ 300 μmol/mol</u> <u>他 100 μmol/mol</u>
二酸化炭素 (CO ₂)	2 μmol/mol	2 μmol/mol
一酸化酸素 (CO)	0.2 μmol/mol	0.2 μmol/mol
硫黄化合物 ^d	0.004 μmol/mol ^f	0.004 μmol/mol ^f
ホルムアルデヒド (HCHO)	0.01 μmol/mol	0.01 μmol/mol
蟻酸 (HCOOH)	0.2 μmol/mol ^f	0.2 μmol/mol ^f
アンモニア (NH ₃)	0.1 μmol/mol ^f	0.1 μmol/mol ^f
ハロゲン化物	0.05 μmol/mol	0.05 μmol/mol
最大粒子状物質サイズ ^e	10 μm	—
最大粒子状物質組成 ^e	1 μg/L at 20 °C and 101.325 kPa	<u>1 mg/kg</u>

^a 水素純度は表 1 記載のガス状不純物の総和（全ガス）を 100 モル分率パーセントから差し引いた数字である。

^b 全ガスは、表 1 中の粒子状物質を除いた不純物の総和である。表 1 中の成分個々の規格値（許容最大不純物組成）の総和より、全ガスの規格値は少ない値となっている。

^c 全炭化水素は含酸素炭化水素も含んでいる。また、C1 換算にて測定される。ただし、メタンのみはこの規定値（2 μmol/mol）を超えることが出来るが、その際、全ガス成分値（100 μmol/mol）を超えてはならない。

^e 少なくとも、通常天然ガスにも含まれる H₂S、COS、CS₂、メルカプタン等については、測定する必要がある。

^e 粒子状物質についてはサンプリング法、分析手順等について今後の向上が必要である。

^f 測定機器の検出下限および分析手順について今後の向上が必要である。特にこれらについて今後の標準化が求められている。

b) その他

また、水素・燃料電池自動車の国際標準・基準と関連の強い SAE (米国自動車技術会)、IPHE (International Partnership for Hydrogen Economy)、FCTESQA (Fuel Cell TEsting, Safety and Quality Assurance)、IEC/TC69 (電気自動車および電動車両産業) の会議に出席し、関連 ISO との整合を図り、情報交換を行った。

(再委託先：財団法人エンジニアリング振興協会)

(イ) 水素技術に係る標準化

a) ISO/TC197(水素技術)国際標準化の基盤造り

<国際標準化提案活動の推進>

【WG14－日本からの新規提案】：WG3 (FCV 以外の水素仕様) は ISO14687-1:1999 として IS 発行されているが、2007 年の見直し投票 (「存続」、「改定」、「廃止」のいずれか) の結果、「改訂」となり、日本から ISO-14687-Part3 として「定置式燃料電池用水素仕様」の新規提案を行なった。2009 年 (H21 年) 11 月に採択され、WG14 として発足した。

<国際標準化活動の支援>

【活動中の WG と内容】

WG	カテゴリ	文書番号	議長国
WG5	水素充填コネクタ	ISO/CD17268 (Rev)	カナダ
WG6	車載用ガス水素容器	ISO/TS15869	カナダ
WG8	水電解水素製造装置 Part1:工業用 Part2:家庭用	ISO22734-1 ISO/CD22734-2	カナダ
WG9	改質器 Part1:安全性 Part2:性能・効率	ISO16110-1 ISO/DIS16110-2	オランダ
WG10	水素吸蔵合金 (MH) 容器	ISO16111	米国
WG11	水素ステーション	ISO/TS 20100	カナダ
WG12	FCV 用水素仕様	ISO/CD14687-2	日本
WG13	水素検知器	ISO/DIS26142	日本
WG14	定置式燃料電池用水素仕様	ISO/WD14687-3	日本
Ad-Hoc	水素部品		米国

①各 WG 国内委員会における平成 20 年度の国際標準及びドラフトに対する審議活動と対応について経緯を含めて下記の進捗状況となっている。(FCV に関連する WG : WG5、WG6、

WG12 については、財団法人日本自動車研究所にて実施されている)

- 【WG8 (水電解装置)】: Part 1(工業用・業務用) 2008 年 6 月に ISO22734-1 が発行された。Part2(家庭用)CD22734-2 に対して、日本からコメント 46 件を提出し、2008 年 6 月ブリスベン会議にて審議され、21 件が採用された。2008 年 11 月ハーグ会議にて日本から屋内の水素パージには換気条件を明記することを提案した結果受理された。IS 化は 2010 年 5 月目標。
- 【WG9 (水素発生装置-改質器)】: Part 1(安全性) 2007 年 3 月 ISO16110-1 が発行された。Part 2(性能・効率)は 2008 年 10 月に DIS16110-2 が投票に回付され、日本はコメント付賛成とした。開票の結果採択されたがコメントが多く、その審議の為 2009 年 1 月米国(ワシントン)にて WG9 会議が開催され、FDIS に追加すべきデータ等日本側のコメントの多くが採用された。IS は 2009 年 10 月を目指す。
- 【WG10(水素吸蔵合金容器)】: 2006 年 10 月に TS16111 が発行された。その後 IS 化を目指し 2008 年 7 月に FDIS 投票に付され日本は賛成投票とした。開票の結果採択され、2008 年 11 月に ISO16111 が発行された。2008 年 6 月の ISO/TC197 ブリスベン総会にてカナダより 120ml 以下の水素吸蔵合金容器の国際標準を Part2 として新規提案したい旨発表された。国際標準となった ISO16111 は国連の危険物輸送委員会(2008 年 12 月)にて正式に引用された。
- 【WG11 (水素ステーション)】: 2008 年 4 月に TS20100(番号変更)が発行された。IS 化に向けて作業が継続され、2008 年 6 月ブリスベン会議、同年 11 月のハーグ会議ではスコープの変更について審議された。CD:2009 年 5 月に回付され、DIS:2010 年 12 月、IS 化は 2011 年 6 月を目指す。
- 【WG13(水素検知器)】:産総研松原氏がコンビナーを勤めており、2008 年 9 月 DIS26142 が投票に回付され、(2009 年 2 月) 開票の結果反対ゼロにて採択された。ただし、コメントが約 170 件と多数あり、FDIS に反映する為、2009 年 3 月ベルリン会議を開催し、コメント審議を行った。FDIS 発行は 2009 年 12 月、IS 化は 2010 年 5 月を目指す。
- 【WG14 (定置式燃料電池用水素仕様)】: 日本からの新規提案として 2009 年 11 月採択され、ENEOS セルテックの田島氏がコンビナーとして WG14 が発足。2010 年 3 月東京にてキックオフ国際ワークショップ会議を開催し、WD14687-3 の Scope(範囲)を審議した。
- 【Ad Hoc (水素部品)】: 事務局(米国)は水素部品 (Dispenser、Hose、Valve、Gauge、etc) について既存の国際規格の適用可否を調査し、四区分 (aa: 既存 IS を無修正で適用可能、bb: 既存 IS を修正することにより適用可能、cc: 既存 IS に関して多数の

変更が必要、dd：新規標準化が必要)に分類され、2007年12月に回付された。2008年6月のISO/TC197ブリスベン総会にてフランスよりこのAd-Hocの中から水蓄圧器の国際標準化新規提案を行ないたい旨表明があった。2010年1月にフランス(Air Liquid)より蓄圧器の新規提案投票結果、正式に採択された。WG15として2010年5月に発足予定。

②学識専門家、業界団体代表者等からなるISO/TC197「水素エネルギー技術標準化委員会」を2008年度及び2009年度に各2回(合計4回)開催し、各WGの進捗状況を報告すると共に新規提案、投票案件など重要事項について審議を行った。

<国際標準化関連審議団体との連携>

ISO/TC197国内WG会議を通じてISO/TC22/SC21、IEC/TC105、ISO/TC58の審議団体であるJARI(日本自動車研究所)、JEMA(日本電機工業会)、KHK(高圧ガス保安協会)や水素ステーションの基準案の策定を行っているPEC(石油活性化センター)との情報交換を行い、積極的に連携を図った。その他、委員会へ相互に登録し連携を図っている。

<国際標準と日本基準・規格との比較>

国際標準化された下記文書の英文和訳を完了した。今後、日本の関連規則(高圧ガス保安法等)との照合作業の予定。(平成21年度へ持越し)

- ・ISO16111(2008年11月15日発行)：水素吸蔵合金(MH)容器 (WG10)
- ・ISO22734-1(2008年07月01日発行)：水電解水素製造装置 Part 1 工業用 (WG8)
- ・ISO16110-1(2007年03月15日発行)：改質器 Part 1 安全性 (WG9)
- ・ISO/TS20100(2008年4月発行)：水素ステーション (WG11)

<国際標準に関する国際活動の支援>

IPHE-ILC(実行連絡委員会の2007年1月の英国会議で「Regulation、Code & Standard」の分化会(RCSWG)が実施され、IPHE/RCSWG事務局からは「RCSWGは基準標準のドラフト作業に直接関わるのではなく、促進触媒又は関係者へのフォーラム機能を果たすものである」との認識を示された。2008-2009年のIPHE-ILC会議では「Regulation、Code & Standard」の分化会(RCSWG)は実施されず、特に進展はない。

b) 国際的技術情報交換などの実施

【WHEC 17 (第17回世界エネルギー会議)】(2008年6月豪州・ブリスベン)

- ・約1000名参加(日本から約100名)各国から水素技術開発に関する発表が300件ほど成された。外にポスタ発表が約250件あり。各国の報告の骨子は下記の通り。
- ・米国：水素社会への政策、水素製造・貯蔵・輸送技術システム開発状況
- ・EU：エネルギーセキュリティ、大気汚染、温室ガス低減、産業競争力確保など
- ・日本：水素ステーション、燃料電池、技術ロードマップなど

- ・ その他、カナダ、韓国、中国、豪州など（省略）

【AHWC (Asian Hydrogen Energy Conference)】(2009年4月韓国 Daegu)

- ・ 参加者日中韓3国より約100名参加。各国の水素に関する国際標準活動の動向について、発表・情報交換を行なった。

また、別紙に特許・論文等についてリストを記載する。

別紙

研究開発項目毎の成果

年度	特許出願			論文発表			新聞報道	受賞
	出願済	登録	実施	査読付き	その他	口頭発表		
H17	2	0	0	6	10	27	1	0
H18	0	0	0	8	22	21	0	0
H19	0	0	0	9	11	156	0	2
H20	0	0	0	5	14	7	0	0
H21	0	0	0	5	11	18	0	1
計	2	0	0	33	68	88	1	3

特許出願リスト

出願に係る特許等の標題	出願人	受付番号	出願日
燃料電池単セルとその組立用治具	財団法人日本自動車研究所	実用新案出願 整理番号:UC127320JR	05.06.17
燃焼試験装置	財団法人日本自動車研究所 石川島播磨重工業株式会社	P2005-369605	05.10.01

論文発表リスト

17年度

査読付き

件名	掲載者	発表媒体	日付
衝突時の水素漏れ許容量の検討	高橋昌志	自動車技術会論文集 Vol.36, No.5	05.09.15
Diffusion and Ignition Tests for Preventing Hydrogen Gas Retention	前田安正	Review of Automotive Engineering Vol.26, No.4	05.10.01
自動車用高圧水素容器の火炎暴露試験の検討－代替充填用ガスの可能性－	田村陽介	自動車技術会論文集 Vol.36, No.6	05.11.15
Exploration of Hydrogen Odorants for Fuel Cell Vehicles	今村大地	Journal of Power Sources Volume 152	05.12.01
Investigation of the Allowable Amount of Hydrogen Leakage Upon Collision	高橋昌志	SAE 2005 Transactions Journal of Passenger Cars - Mechanical System	06.03
CFD Analysis of Fire Testing of Automotive Hydrogen Gas Cylinders With Substitutive Gases	田村陽介	SAE 2005 Transactions Journal of Passenger Cars - Mechanical System	06.03

その他

査読なし

件名	掲載者	発表媒体	日付
燃料電池関連の試験方法及び試験設備の紹介	鈴木仁治	自動車技術 Vol.59, No.7	05.06.30
水素燃料電池自動車の燃費計測手法および	黒田英二	自動車研究 第27巻	05.07.01

試験機器の開発		第7号 2005年7月	
参照極付き JARI 標準セルによる発電性能の評価	今村大地	自動車研究 第27巻 第7号 2005年7月	05.07.01
燃料電池システム性能評価試験方法の検討	守谷憲造	自動車研究 第27巻 第7号 2005年7月	05.07.01
単セルとスタックとの性能相関の検討 ー電極面積の影響ー	橋正好行	自動車研究 第27巻 第7号 2005年7月	05.07.01
自動車用高圧水素容器の許容欠陥確認試験 (第一報) ー破裂前漏洩の状況とひずみの挙動ー	飯島考文	自動車研究 第27巻 第7号 2005年7月	05.07.01
自動車用高圧水素容器の破裂試験	飯島考文	自動車研究 第27巻 第7号 2005年7月	05.07.01
高圧水素ガス容器の動的外力破裂試験	三石洋之	自動車研究 第27巻 第7号 2005年7月	05.07.01
自動車用高圧水素ガス容器の火炎暴露試験 方法の検討：第2報ー火炎規模および火源の燃料種類の影響ー	田村陽介	自動車研究 第27巻 第7号 2005年7月	05.07.01
トンネル内水素漏洩拡散シミュレーション ートンネル内事故時の漏洩水素の安全性評価ー	向井新治	自動車研究 第27巻 第7号 2005年7月	05.07.01

口頭発表

件名	掲載者	発表媒体	日付
Fuel Consumption Measurement Methods for Hydrogen FCV	酒井孝之	ISO/TC22/SC21/WG2/TF1 Meeting	05.04.22
燃料電池システム評価試験方法の検討	守谷憲造	第12回燃料電池シンポジウム	05.05.11
CFD Simulation on Diffusion of Hydrogen Leakage Caused by Fuel Cell Vehicle Accident in Tunnel, Underground Parking Lot and Multistory Parking Garage	向井新治	ESV 2005	05.06.08
JARI's Plans for Long term H2 Specification	赤井泉明	ISO/TC197/WG12 Meeting	05.06.30
Fuel Consumption Measurement Methods for Hydrogen FCV	酒井孝之	SAE FCSC Emission and Fuel Consumption WG	05.07.20
CFD Simulation on Diffusion of Leaked Hydrogen Caused by Vehicle Accident in Tunnels	向井新治	International Conference for Hydrogen Safety	05.09.08
Dynamic Crush Test on Hydrogen Pressurized Cylinder	三石洋之	International Conference for Hydrogen Safety	05.09.08
The New Facility for Hydrogen and Fuel Cell Vehicle Safety Evaluation	渡辺正五	International Conference for Hydrogen Safety	05.09.08
水素・燃料電池自動車安全性評価試験施設	渡辺正五	燃料電池開発情報センター 第97回研究会	05.09.20
「圧縮水素自動車燃料装置用容器・付属品」 技術基準策定の概要	三石洋之	日本機械学会 2005年度年次 大会ワークショップ「燃料電池 自動車用 75MPa 容器の実用化への課題」	05.09.22
JARI Stack Testing Methodology	渡辺正五	National Research Council of Canada FC Testing Workshop	05.09.29
ガス充填口水素漏れ許容量の検討	高橋昌志	自動車技術会 2005年秋季学術講演会	05.09.30

精度・信頼性向上のための自動車用圧縮水素容器の火炎暴露試験	田村陽介	自動車技術会 2005年秋季学術講演会	05.09.30
水素ガス漏えいを想定した車両引火試験	前田安正	自動車技術会 2005年秋季学術講演会	05.09.30
燃料電池自動車用水素付臭剤の探索	今村大地	自動車技術会 2005年秋季学術講演会	05.09.30
高圧水素容器の安全性研究 車載用コンパクト水素容器の各種安全性試験結果とその評価	渡辺正五	HESS 特別講演会「水素・燃料電池の規制緩和と安全技術研究」	05.10.06
水素・燃料電池自動車の安全性評価	渡辺正五	自動車技術会関東支部 第1回講演会「燃料電池車の普及に向けて」	05.10.11
水素・燃料電池自動車の安全性	渡辺正五	科学技術交流財団「燃料電池の実用化に関する研究会」 第2回研究会	05.10.13
Fuel Consumption Measurement Methods for Hydrogen FCV	黒田英二	HFCV gr Informal Group Meeting	05.10.21
燃料電池自動車普及のための基盤技術	渡辺正五	東京モーターショー シンポジウム	05.10.31
燃料電池自動車普及のための基盤技術	渡辺正五	JARI/IEA シンポジウム	05.10.31
Fuel Consumption Measurement Methods for Hydrogen FCV	黒田英二	ISO/TC22/SC21/WG2/TF1 Meeting	05.11.07
単セルとスタックとの性能関連の検討－電極面積の影響－	橋正好行	電気化学会第46回電池討論会	05.11.16
Exploration of Hydrogen Odorants for Fuel Cell Vehicles	今村大地	Journal of Power Sources	05.12
Development of JARI Single Cell and Testing Protocol	赤井泉明	USFCC/JARI Meeting	06.01.20
水素・燃料電池自動車の安全性評価	渡辺正五	FC EXPO 2006 第2回国際水素・燃料電池展 専門技術セミナー	06.01.25
燃料電池自動車の安全性	渡辺正五	燃料電池開発情報センター 第98回研究会	06.01.24

18年度
査読付き

件名	掲載者	発表媒体	日付
Study of Fuel Cell Structure and Heating Method Development of JARI's Standard Single Cell	橋正好行	Journal of Power Sources, 155(2),182 (2006)	06.04.21
自動車用圧縮水素容器の火炎暴露試験精度・信頼性向上	田村陽介	自動車技術会論文集 Vol.37, No.3	06.05.01
Adaptability of Sulfur-free Odorous Compounds to Hydrogen Odorants for Fuel Cell Vehicles	今村大地	Review of Automotive Engineering (2006/7)Vol.27, No.3	06.07.01
自動車用圧縮水素容器の常温圧力サイクル試験－容器の疲労におよぼす上限圧力の影響－	富岡純一	自動車技術会論文集 Vol.38, No.2	07.03
Development of Fuel Consumption Measurement Methods for Hydrogen Fuel Cell Vehicles	黒田英二	SAE 2006 Transactions Journal of Engines, Vol.115, Section3	07.03
Fire Safety Evaluation of a Vehicle Equipped with Hydrogen Fuel Cylinders: Comparison	鈴木仁治	SAE 2006 Transactions Journal of Passenger Cars -	07.03

with Gasoline and CNG Vehicles		Mechanical System	
Improvement of Flame Exposure Test for High Pressure Hydrogen Cylinders to Achieve High Reliability and Accuracy	田村陽介	SAE 2006 Transactions Journal of Passenger Cars - Mechanical System	07.03
Test of Vehicle Ignition Due to Hydrogen Gas Leakage	前田安正	SAE 2006 Transactions Journal of Passenger Cars - Mechanical System	07.03

その他
査読なし

件名	掲載者	発表媒体	日付
Development of Fuel Consumption Measurement Methods for Hydrogen Fuel Cell Vehicles	黒田英二	Applications of Fuel Cells in Vehicles 2006 SP-2006	06.04
Fire Safety Evaluation of a Vehicle Equipped with Hydrogen Fuel Cylinders: Comparison with Gasoline and CNG Vehicles	鈴木仁治	Vehicle Fire 2006 SP-1990	06.04.03
Improvement of Flame Exposure Test for High Pressure Hydrogen Cylinders to Achieve High Reliability and Accuracy	田村陽介	Vehicle Fire 2006 SP-1990	06.04.03
Test of Vehicle Ignition Due to Hydrogen Gas Leakage	前田安正	Vehicle Fire 2006 SP-1990	06.04.03
燃料電池自動車燃費試験用の水素流量計の開発	黒田英二	自動車研究 第28巻 第7号 2006年7月	06.07.01
燃料電池自動車用水素付臭剤の適用性評価ー化学的安定性と拡散性ー	今村大地	自動車研究 第28巻 第7号 2006年7月	06.07.01
自動車用圧縮水素容器のガス透過の温度依存性に関する研究	糸井裕彦	自動車研究 第28巻 第7号 2006年7月	06.07.01
車両火災を伴う水素噴出火炎のサーマルマネキンによる熱的影響評価	田村陽介	自動車研究 第28巻 第7号 2006年7月	06.07.01
自動車用圧縮水素容器の急速充填における容器内温度挙動：第1報	広谷龍一	自動車研究 第28巻 第7号 2006年7月	06.07.01
自動車用圧縮水素容器への急速充填の数値解析	伊藤裕一	自動車研究 第28巻 第7号 2006年7月	06.07.01
圧縮水素容器搭載自動車の火災安全性評価ーガソリンおよびCNG自動車との比較ー	鈴木仁治	自動車研究 第28巻 第7号 2006年7月	06.07.01
実車両における水素漏洩時の逸散・引火挙動	前田安正	自動車研究 第28巻 第7号 2006年7月	06.07.01
自動車用圧縮水素容器の常温圧力サイクル試験:第1報ー容器寿命におよぼす上限圧力の影響ー	飯島孝文	自動車研究 第28巻 第7号 2006年7月	06.07.01
自動車用圧縮水素容器の常温圧力サイクル試験:第2報ー疲労過程におよぼす上限圧力の影響ー	大居利彦	自動車研究 第28巻 第7号 2006年7月	06.07.01
トンネル内水素漏洩拡散シミュレーション:第2報ートンネル内事故時の漏洩水素の安全性評価ー	向井新治	自動車研究 第28巻 第7号 2006年7月	06.07.01
JARI Standard Single Cell Testing Protocol	富岡秀徳	自動車研究 第28巻 第7号 2006年7月	06.07.01
JHFCステーション充填コネクタ調査	福本紀	自動車研究 第28巻 第7号 2006年7月	06.07.01
日本自動車研究所 水素・燃料電池自動車安全評価ー耐爆火災試験設備の紹介ー	鈴木仁治	火災学会誌 Vol.56,No.5	06.10.01

Fuel Cell Stack Testing Methodology	黒田英二	EVS-22 Proceeding	06.10
Study of Performance Reproducibility of JARI Standard Single Cell – Cell Performance Crosscheck between HNEI and JARI –	橋正好行	自動車研究 第29巻 第1号 2007年1月	07.01.01
自動車用圧縮水素容器の急速充填における容器内温度挙動	広谷龍一	自動車技術会論文集	07.03
自動車用圧縮水素容器の破裂試験	飯島孝文	自動車技術会論文集	07.03

口頭発表

件名	掲載者	発表媒体	日付
Development of Fuel Consumption Measurement Methods for Hydrogen Fuel Cell Vehicles	黒田英二	2006 SAE World Congress	06.04.03
Fire Safety Evaluation of a Vehicle Equipped with Hydrogen Fuel Cylinders: Comparison with Gasoline and CNG Vehicles	鈴木仁治	2006 SAE World Congress	06.04.03
Improvement of Flame Exposure Test for High Pressure Hydrogen Cylinders to Achieve High Reliability and Accuracy	田村陽介	2006 SAE World Congress	06.04.03
Test of Vehicle Ignition Due to Hydrogen Gas Leakage	前田安正	2006 SAE World Congress	06.04.03
Development of Hydrogen Flowmeter for Fuel Consumption Measurement of FCV	黒田英二	ISO/TC22/SC21/WG2/TF1 Meeting	06.05.18
自動車用圧縮水素容器のガス透過試験の温度依存性について	向井新治	自動車技術会 2006年春季学術講演会	06.05.24
自動車用圧縮水素容器の破裂試験	飯島孝文	自動車技術会 2006年春季学術講演会	06.05.26
自動車用圧縮水素容器の許容欠陥確認試験	大居利彦	自動車技術会 2006年春季学術講演会	06.05.26
自動車用圧縮水素容器の急速充填における容器内温度挙動	広谷龍一	自動車技術会 2006年春季学術講演会	06.05.26
Hydrogen Pressure Burst Test and Pressure Cycling Test of Compressed Hydrogen Tanks	押野幸一	16th World Hydrogen Energy Conference	06.06.13
Thermal Behavior in Hydrogen Storage Tank for Fuel Cell Vehicle on Fast Filling	広谷龍一	16th World Hydrogen Energy Conference	06.06.15
ISO/TC197/WG12 標準化動向－水素燃料製品仕様－	富岡秀徳	FCCJ 第2回標準化・規制見直し動向説明会	06.08.29
容器基準合理化に向けた自動車業界の動向	福本紀	FCCJ 第2回標準化・規制見直し動向説明会	06.08.29
自動車用圧縮水素容器の技術基準およびその評価法	三石洋之	プラスチック成形加工学会 第93回講演会 燃料電池を支える要素技術を考える－高圧圧力容器の現状－	06.09.08
自動車用圧縮水素容器の常温圧力サイクル試験－容器の疲労におよぼす上限圧力の影響－	富岡純一	自動車技術会 2006年秋季学術講演会	06.09.27
70MPa 自動車用圧縮水素容器の火炎暴露による破裂試験	田村陽介	自動車技術会 2006年秋季学術講演会	06.09.27
自動車用圧縮水素容器における急速充填の数値解析	伊藤裕一	自動車技術会 2006年秋季学術講演会	06.09.27

燃料電池自動車の水素漏洩箇所と引火時の 周囲影響の関係	前田安正	自動車技術会 2006年秋季学術講演会	06.09.27
Fuel Cell Stack Testing Methodology	黒田英二	EVS-22 22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exposition	06.10.01
Adaptability of Sulfur-free Smelling Compounds to Hydrogen Odorants for Fuel Cell Vehicles	今村大地	H2 Expo 2006 (International Conference and Trade Fair on Hydrogen and Fuel Cell Technologies)	06.10.25
Development of Flow Method for Fuel Consumption Measurement of FCV	矢野勝	ISO/TC22/SC21/WG2/TF1 Meeting	06.10.30

19年度
その他
査読付き

件名	掲載者	発表媒体	日付
自動車用圧縮水素容器の破裂試験	飯島孝文	自動車技術会論文集 Vol.38, No.2	07.03
自動車用圧縮水素容器の急速充填における 容器内温度挙動	広谷龍一	自動車技術会論文集 Vol.38, No.2	07.03
自動車用圧縮水素容器の常温圧力サイクル 試験－容器の疲労におよぼす上限圧力の影 響－	富岡純一	自動車技術会論文集 Vol.38, No.2	07.03
Fire Safety Evaluation of a Vehicle Equipped with Hydrogen Fuel Cylinders: Comparison with Gasoline and CNG Vehicles	鈴木仁治	SAE 2006 Transactions Journal of Passenger Cars - Mechanical System	07.04
Improvement of Flame Exposure Test for High Pressure Hydrogen Cylinders to Achieve High Reliability and Accuracy	田村陽介	SAE 2006 Transactions Journal of Passenger Cars - Mechanical System	07.04
Test of Vehicle Ignition Due to Hydrogen Gas Leakage	前田安正	SAE 2006 Transactions Journal of Passenger Cars - Mechanical System	07.04
自動車用圧縮水素容器の許容欠陥確認試験	大居利彦	自動車技術会論文集 Vol.38, No.3	07.05
The new facility for hydrogen and fuel cell vehicle safety evaluation	渡辺正五	International Journal of Hydrogen Energy	07.06
Effect of Sulfur-Containing Compounds on Fuel Cell Performance	今村大地	ECS Transactions, Vol.11 (1), 853 (2007)	07.09

査読なし

件名	掲載者	発表媒体	日付
JARI 標準セルを用いた単セル標準試験法の 検討	富岡秀徳	燃料電池, Vol.6, No.4, 78 (2007)	07.04
燃料電池自動車の燃費計測手法(脈動に対 応した流量法)	矢野勝	自動車研究 29 巻 6 号	07.06.01
燃料電池の水素循環系における不純物の濃 縮調査 -CH ₄ 、CO の濃縮挙動について	松田佳之	自動車研究 29 巻 6 号	07.06.01
燃料電池自動車に係る標準化活動への FC・EV センターの取り組み	富岡秀徳	自動車研究 29 巻 6 号	07.06.01
自動車用圧縮水素容器の常温圧力サイクル 試験－VH4 容器の寿命におよぼす上限圧 力の影響－	富岡純一	自動車研究 29 巻 7 号	07.07.01

自動車用圧縮水素容器の極端温度圧力サイクル試験－試験温度による性能劣化－	山崎義男	自動車研究 29 巻 7 号	07.07.01
自動車用圧縮水素容器の急速充填における容器内温度挙動（第 2 報）	寺田利宏	自動車研究 29 巻 7 号	07.07.01
液化水素漏洩挙動の調査	高橋昌志	自動車研究 29 巻 7 号	07.07.01
水素消費による容器および附属品の温度変化の研究	糸井裕彦	自動車研究 29 巻 7 号	07.07.01
自動車用圧縮水素容器の静電気特性	田村陽介	自動車研究 29 巻 7 号	07.07.01
水素吸蔵合金タンクの安全性評価試験 水素サイクル試験法の調査	高橋昌志	自動車研究 29 巻 7 号	07.07.01

口頭発表

件名	掲載者	発表媒体	日付
Ambient Temperature Pressure Cycling Test of Compressed Hydrogen Tanks for Vehicles ~ Influence of Maximum Pressure on Tank Fatigue	富岡純一	2007 SAE World Congress	07.04.16
Diffusion and Ignition Behavior on the Assumption of Hydrogen Leakage From a Hydrogen-Fueled Vehicle	前田安正	2007 SAE World Congress	07.04.16
Numerical Study of the Thermal Behavior on Fast Filling of Compressed Gaseous Hydrogen Tanks	伊藤裕一	2007 SAE World Congress	07.04.16
Safety Evaluation on Fuel Cell Stacks Fire and Toxicity Evaluation of Material Combustion Gas for FCV	鈴木仁治	2007 SAE World Congress	07.04.16
Thermal Behavior in Hydrogen Storage Tank for Fuel Cell Vehicle on Fast Filling	広谷龍一	2007 SAE World Congress	07.04.16
燃料電池自動車関連の標準化動向	富岡秀徳	第 95 回燃料電池研究会セミナー	07.05.24
自動車用圧縮水素容器の急速充填における容器内温度挙動（第 2 報）	広谷龍一	自動車技術会 2007 年春季学術講演会	07.05.25
The Standardization of the Hydrogen Quality for Fuel Cell Vehicles	富岡秀徳	ISO197/IEC105 Seminar on the International Standards of Hydrogen & Fuel Cell Technologies	07.06
Study of Performance Reproducibility of JARI Standard Single Cell	橋正好行	The Fifth International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology	07.06
Impact of Hydrogen Fuel Impurities Impurities on PEMFC Performance	今村大地	2007JSAE/SAE International Fuels and Lubricants Meeting	07.07
Development of Fuel Consumption Measurement Method for Fuel Cell Vehicle -Flow Method Corresponding to Pressure Pulsation of Hydrogen Flow-	矢野勝	2007JSAE/SAE International Fuels and Lubricants Meeting	07.07
Hydrogen Flowmeter and Flow Oscillation Absorber for Fuel Consumption Measurement of FCV	黒田英二	4th Annual International Fuel Cell Testing Workshop	07.09.13
Effect of Air Quality on the Fuel Cell Performance	渡辺正五	International Workshop on Degradation Issues of Fuel Cells	07.09
燃料電池の水素循環系における不純物の濃	松田佳之	第 48 回電池討論会	07.11

縮調査			
燃料電池単セル性能の測定法に関する検討	橋正好行	第 48 回電池討論会	07.11

20年度
査読付き

件名	掲載者	発表媒体	日付
Diffusion and Ignition Behavior on the Assumption of Hydrogen Leakage From a Hydrogen-Fueled Vehicle	前田安正	SAE 2007 Transactions Journal of Passenger Cars - Mechanical System	08.04
Safety Evaluation on Fuel Cell Stacks Fire and Toxicity Evaluation of Material Combustion Gas for FCV	鈴木仁治	SAE 2007 Transactions Journal of Passenger Cars - Mechanical System	08.04
Impact of Hydrogen Fuel Impurities Impurities on PEMFC Performance	今村大地	SAE 2007 Transactions Journal of Fuel and Lubricants, Vol.116, Section4	08.08
Development of Fuel Consumption Measurement Method for Fuel Cell Vehicle-Flow Method Corresponding to Pressure Pulsation of Hydrogen Flow-	矢野勝	SAE 2007 Transactions Journal of Fuel and Lubricants, Vol.116, Section4	08.08
燃料電池の水素循環系における不純物の濃縮挙動	松田佳之	自動車技術会論文集	09.01

その他
査読なし

	掲載者	発表媒体	日付
自動車圧縮水素容器（VH3）の疲労寿命に及ぼす環境温度の影響	富岡純一	自動車研究 30 巻 6 号	08.06.01
水素技術に係わる国際標準化の動向－高压水素技術関連－	福本 紀	自動車研究 30 巻 6 号	08.06.01
自動車圧縮水素容器（VH4）の破裂強度に及ぼす圧力サイクルの影響	富岡純一	自動車研究 30 巻 6 号	08.06.01
自動車圧縮水素容器（VH3）の疲労寿命に及ぼす環境温度の影響	富岡純一	自動車研究 30 巻 6 号	08.06.01
自動車用圧縮水素容器の急速充填における容器内温度挙動（第3報）	吉村大士	自動車研究 30 巻 6 号	08.06.01
自動車用圧縮水素容器のガス透過の温度、圧力および材質依存性に関する研究（第1報）	糸井裕彦	自動車研究 30 巻 6 号	08.06.01
多孔質可燃物下での水素ガス漏洩による拡散と燃焼挙動	田村陽介	自動車研究 30 巻 6 号	08.06.01
自動車用圧縮水素容器の急速充填シミュレーション－実在気体の影響－	木枝香織	自動車研究 30 巻 6 号	08.06.01
車両改造不要な FCV 燃費計測手法の開発－酸素バランス法の検証実験－	矢野勝	自動車研究 30 巻 7 号	08.07.01
JARIにおけるFCV燃費計測法開発	黒田英二	自動車研究 30 巻 7 号	08.07.01
燃料電池の水素循環系における不純物の濃縮挙動	松田佳之	自動車研究 30 巻 7 号	08.07.01
水素技術に係る国際標準化の動向－水素燃料仕様について	富岡秀徳	自動車研究 30 巻 7 号	08.07.01
電気自動車に関する国際標準化の動向と見通し	富岡秀徳	自動車技術 Vol.62 No.103	08.10
燃料電池車の国際標準化の現状	富岡秀徳	OHM	09.01

口頭発表

件名	掲載者	発表媒体	日付
Calculation of Hydrogen Consumption for Fuel Cell Vehicles by Exhaust Gas Formulation	黒田英二	2008 SAE World Congress	08.04.14

Investigation of the Allowable Flow Rate of Hydrogen Leakage on Receptacle	高橋昌志	2008 SAE World Congress	08.04.15
Thermal Behavior in Hydrogen Storage Tank for Fuel Cell Vehicle on Fast Filling (2nd Report)	寺田利宏	2008 SAE World Congress	08.04.15
自動車用圧縮水素容器の急速充填における容器内温度挙動(第3報) —水素噴出口径・噴出方向の及ぼす影響—	吉村大士	自動車技術会 2008年春季学術講演会	08.05.21
燃料電池の水素循環系における不純物の濃縮挙動	松田佳之	自動車技術会 2008年春季学術講演会	08.05
Fatigue Strength Degradation of Type IV Compressed Hydrogen Tanks under High Temperature	富岡純一	Duracosys2008 8Th International Conference on Durability of Composite System	08.07.17
水素燃料性状が燃料電池に与える影響	赤井泉明	再生可能エネルギー世界フェア「水素・燃料電池」フォーラム	08.07

21年度
査読付き

件名	掲載者	発表媒体	日付
Investigation of the Allowable Flow Rate of Hydrogen Leakage on Receptacle	高橋昌志	SAE 2009 Transactions Journal of Passenger Cars - Mechanical System	09.04
Accumulation of Impurities in Hydrogen Circulation System of PEFC	松田佳之	Review of Automotive Engineering, 2009.4 Vol.30 (2009)	09.04
Effects of Platinum Loading on PEFC Power Generation Performance Deterioration by Carbon Monoxide in Hydrogen Fuel	橋正好行	ECS transactions, 26(1), 131 (2010)	10.01
自動車用圧縮水素容器(VH3)の疲労寿命に及ぼす環境温度の影響	富岡純一	自動車技術会論文集 Vol.41, No.2	10.03
自動車用圧縮水素容器のガス透過の温度,圧力及び材質依存性に関する研究	糸井裕彦	自動車技術会論文集 Vol.41, No.2	10.03

その他
査読なし

	掲載者	発表媒体	日付
自動車用圧縮水素容器の急速充填における容器内温度挙動(第4報)	吉村大士	自動車研究 31 巻 6 号	09.06.01
圧縮水素容器(VH3)の容器寿命におよぼす下限圧力の影響	富岡純一	自動車研究 31 巻 6 号	09.06.01
自動車用圧縮水素容器(VH4)の疲労特性に及ぼす環境温度の影響	木口和博	自動車研究 31 巻 6 号	09.06.01
圧縮水素容器搭載車両の火災対応に関する一考察	田村陽介	自動車研究 31 巻 6 号	09.06.01
自動車用圧縮水素容器のガス透過の温度,圧力および材質依存性に関する研究(第2報) —充填圧力 70MPa でのガス透過データの拡充—	糸井裕彦	自動車研究 31 巻 6 号	09.06.01

燃料電池自動車用水素付臭剤の適用性評価 －被毒低減手法の検討と水素循環系での濃縮挙動の評価－	今村大地	自動車研究 Vol.31, No.7 (2009)	09.07.01
Pt 担持量が CO による PEFC 発電性能の低下に及ぼす影響	橋正好行	自動車研究 Vol.31, No.7 (2009)	09.07.01
混合不純物 (CO, H ₂ S) が燃料電池の発電性能へ与える影響	松田佳之	自動車研究 Vol.31, No.7 (2009)	09.07.01
水素貯蔵システムの最新技術動向	三石洋之	「Motor Ring No.29」自動車技術会	09.10
燃料電池自動車の実用化と安全性		標準化と品質管理	09.11
燃料電池自動車の普及に向けた最近の動向	富岡秀徳	高速道路と自動車	10.02

口頭発表

件名	掲載者	発表媒体	日付
水素中の不純物が燃料電池の発電性能に及ぼす影響	赤井泉明	固体高分子形燃料電池先端基盤センター (FC-Cubic) ワークショップ	09.04
自動車用燃料電池 MEA の耐久性評価法の検討	赤井泉明	自動車技術会 2009 春季大会	09.05
Influence of Temperature on the Fatigue Strength of Compressed Hydrogen Tanks for Vehicle	富岡純一	ICHS 3rd ICHS, International Conference on Hydrogen Safety	09.09.16
自動車用燃料電池 MEA の耐久性評価法の検討	橋正好行	燃料電池基盤技術研究懇話会	09.09
Impurities accumulation due to hydrogen recirculation	松田佳之	International Workshop on Fuel and Air Quality Issues in Fuel Cells	09.09
Influence of Pt Loading on Fuel Cell Performance	橋正好行	International Workshop on Fuel and Air Quality Issues in Fuel Cells	09.09
多孔質の天井材が装備された空間での水素漏洩による燃焼挙動について	田村陽介	自動車技術会 2009 年秋季学術講演会	09.10.07
自動車用圧縮水素容器のガス透過の温度, 圧力及び材質依存性について	田村陽介	自動車技術会 2009 年秋季学術講演会	09.10.07
自動車用圧縮水素容器 (VH3) の疲労寿命に及ぼす環境温度の影響	富岡純一	自動車技術会 2009 年秋季学術講演会	09.10.07
自動車用圧縮水素容器の急速充填における容器内温度挙動 (第 4 報) - 容器システムへの急速充填 -	吉村大士	自動車技術会 2009 年秋季学術講演会	09.10.07
Accumulation behavior of impurities in fuel cell hydrogen circulation system	松田佳之	2009 Fuel Cell Seminar & Exposition	09.11
Effects of Pt loading on power generation performance decrease by CO	橋正好行	2009 Fuel Cell Seminar & Exposition	09.11
自動車用燃料電池 MEA の耐久性評価法の検討	橋正好行	第 3 回燃料電池部門委員会	09.11
多孔質の天井材空間下での水素漏洩による拡散と火炎の振る舞い	田村陽介	第 47 回燃焼シンポジウム	09.12.03
自動車用圧縮水素容器 (VH3) の疲労寿命に及ぼす下限圧力の影響	富岡純一	第 29 回水素エネルギー協会大会	09.12.03

自動車用圧縮水素容器のガス透過の温度,圧力及び材質依存性に関する研究	糸井裕彦	第 29 回水素エネルギー協会大会	09.12.03
自動車用圧縮水素容器の急速充填における容器内温度挙動 (第 3 報)	前田安正	第 29 回水素エネルギー協会大会	09.12.03
海外学会における燃料電池関連の発表紹介	橋正好行	第 106 回燃料電池研究会セミナー	09.12

新聞報道

日刊工業新聞 2005 年 6 月 2 日「燃料電池のサムライ達⑧」
安全基準づくり「水素燃料の規格化柱に防爆施設をフル活用」

受賞実績

- ・ 自動車技術会 技術開発賞、鈴木仁治、渡辺正五、水素・燃料電池自動車安全性評価試験設備 (Hy-SEF) を完成 (2007 年)
- ・ 浅原賞学術奨励賞、今村大地、Adaptability of Sulfur-free Odorous Compounds to Hydrogen Odorants for Fuel Cell Vehicles (2007 年)
- ・ 浅原賞学術奨励賞、松田佳之、Accumulation of Impurities in Hydrogen Circulation System of PEFC (2010 年)

以 上