

2.2 研究開発項目 B「定置用燃料電池システム等に係る規制再点検及び標準化のための研究開発」

2.2.1 定置用燃料電池システムに係る規制再点検及び標準化のための研究開発

2.2.1.1 定置用固体高分子形燃料電池に係わる基準・標準化対応

2.2.1.1.1 供試体の調達

定置用で小形（発電出力 10kW 未満、最高使用圧力 0.1MPa 未満）の PEFC システムについて、国内及び海外のメーカーの開発状況を調査した結果を踏まえて、データを収集する PEFC システムの供試体（以下「PEFC 供試体」とする）は、納入時に発電効率 30%（HHV）以上、総合効率 65%（HHV）以上を満たすことを条件として選定を行った。

選定した 7 機種種の PEFC 供試体の外観を図Ⅲ2.2.1.1.1-1 に示す。これらはいずれもコージェネレーション仕様のものである。供試体は（財）日本ガス機器検査協会（JIA）の東京事業所或いは名古屋検査所に設置して試験を行った。尚、試験装置の整備及び試験装置や分析機器の保守・点検は（財）日本ガス機器検査協会が実施した。



図Ⅲ2.2.1.1.1-1 PEFC 供試体の外観状況

2.2.1.1.2 安全性に係わる課題対応

2.2.1.1.2.1 過圧防止装置省略時の安全性試験

(1) 目的

過圧防止装置を省略した際の安全性を評価する試験方法を提供する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

測定項目：送電端出力、耐圧部分圧力、燃料改質装置温度、燃料流量、耐圧部分の変形、破損の目視確認、異常音、異常臭の確認

測定周期：1秒^{※1}

※1：燃料電池システムからのデータ出力周期が1秒以上の場合は、メーカーが規定する最短の出力周期で行うこととする。

②データ収集方法

1) 試験準備

- a) 改質器を含む燃料系統の耐圧部分において、通常運転時及び停止時に最も圧力が高くなる部位に圧力計を設置しておく。
- b) 当該耐圧部分の過圧防止装置の動作圧力を耐圧設計値に設定する。
- c) 過圧防止装置の動作圧力を耐圧設計値に設定できない場合は、メーカーが推奨する実験可能耐圧の範囲内で試験を行う。
- d) フェールオープン等の過圧防止装置代替機能を備えているものは、当該機能を生かした状態で試験を行う。

2) 制御電源異常試験

- a) 定格出力到達後 30 分以上経過していることを確認し、測定開始 10 分後に制御装置の電源を遮断する。このとき、異常音、異臭等が発生しないか注視し、結果を記録する。
- b) 制御装置の電源を遮断してから 6 時間経過後にデータ収集を終了する。
- c) 耐圧部分の変形、損傷を確認し、結果を記録する。

注 1) 制御装置の電源遮断に伴ってデータ出力が喪失する機器は、他の機器が動作しない措置を講じた上で制御電源を再投入し、データ出力を継続させること。

注 2) 試験中は耐圧部分の圧力推移に注意し、メーカーの判断により、試験を中止しても良い。

3) プロセス系経路出口閉塞試験

- a) 定格出力到達後 30 分以上経過していることを確認し、測定開始 10 分後にプロセス系経路の出口側にある遮断弁を閉止する。当該遮断弁が設置されていないシステムの場合は、排気口などの排気系統を閉塞することとする。このとき、異常音、異臭等が発生しないか注視し、結果を記録する。
- b) 遮断弁を閉止（排気口などを閉塞）し、システムが異常を検知して停止動作に移行して

から6時間経過後にデータ収集を終了する。

c) 耐圧部分の変形、損傷を確認し、結果を記録する。

③判定方法

耐圧部分の最大圧力及び試験時の外観異常を確認して記載する。

(3) データ収集の実施

制御電源異常試験およびプロセス系経路出口閉塞試験の結果、過圧防止装置を省略したPEFC 供試体について、試験後の耐圧部分に変形や破損等の外観異常も発生せず、当該異常時には過圧にならないことを確認した。

(4) 評価方法の検討

測定終了までの時間について、異常操作後「6時間」としているが、圧力が最も高くなるのは定格運転中か異常操作直後であり「耐圧部の圧力が低下することを確認できたらデータ収集を終了」あるいは「PEFCシステムが停止してから1時間後にデータ収集を終了」とすることも考えられたが、PEFCシステム停止後に数10分してから、バルブ動作等によって急激に20kPa以上圧力が上昇しているPEFC供試体もあり、今後市場に出る新たな仕様のPEFCシステムも適正に評価できるように、測定終了までの時間を異常捜査後「6時間」とすることとした。

2.2.1.1.2.2 可燃性ガス検知器省略時の安全性試験

(1) 目的

可燃性ガス漏洩検知器を省略した際に、可燃性ガス漏洩に伴うプロセス内での熱収支異常などの代替手法の有効性について、技術的検証を行う試験方法を提供する。

(2) 代替手法の有効性検証ロジック

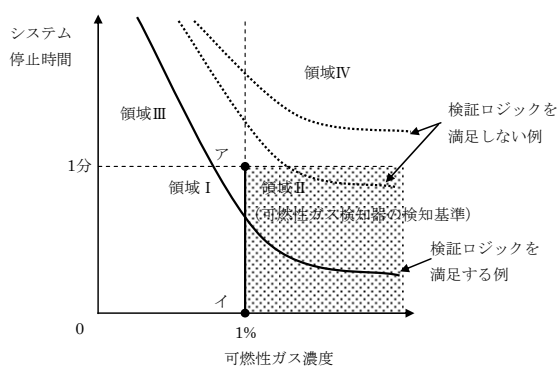
①前提条件

- 1) 可燃性ガス検知器を省略したPEFCシステムにおいて、可燃性ガスを通じる配管のある場所から可燃性ガスが漏洩したとする。この際、例えばスタックの入口付近で改質ガスを漏洩させると、発電に使用する燃料流量が減少することによりセル電圧の低下、あるいはオフガスの流量低下による改質器の温度低下などが発生し、可燃性ガス検知以外のインターロック項目（代替手法）によってPEFCシステムは停止する。
- 2) ある可燃性ガス漏洩流量において可燃性ガスを漏洩させ、この際にある測定点（可燃性ガス検知器設置場所、パッケージ換気の出口など）における「可燃性ガス濃度」を横軸に、代替手法によってPEFCシステムが停止した「システム停止時間」を縦軸にプロットする。可燃性ガス漏洩流量を変化させながら両者の関係をプロットしていくと、ひとつの曲線（システム特性曲線）となる。
- 3) システム特性曲線は、図Ⅲ2.2.1.1.2.2-1のように単調減少の曲線となる。これは、可燃性ガスの漏洩量が増加（可燃性ガス濃度も増加する）すれば、熱収支などの異常がより顕著となるため、システムは早期に停止することを表している。実際のPEFCシステムにおいて予備測定を行った結果（図Ⅲ2.2.1.1.2.2-2）、上記仮説の通り、システム特性曲線

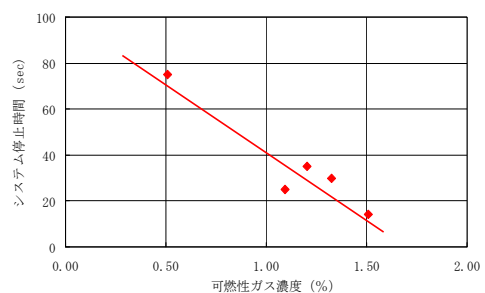
は単調減少の曲線となっていることが確かめられた。

②代替手法が有効であると考えられる条件

- 1) 可燃性ガス検知器の検知基準は、「爆発下限界の 1/4 (1%) 以上のときに 60 秒 (1 分) 以内に信号及び警報を発する」ことである。これは代替手法においては、「可燃性ガス濃度が 1%以上のときに 1 分以内でシステムが停止する」とことと解釈され、図Ⅲ2.2.1.1.2.2-1 の領域Ⅱに相当する。
- 2) 曲線が単調減少であることを考慮すると、領域Ⅱにおいて条件的に最も厳しいのは、濃度が最も低い 1%において 60 秒以内に停止することであり、代替手法が領域Ⅱを満足するためには、システム特性曲線が図Ⅲ2.2.1.1.2.2-1 に示す線分ア-イを通過すればよい。これにより、「可燃性ガス濃度が 1%以上のときに 1 分以内でシステムが停止する」といえる。
- 3) 曲線が単調減少であることを考慮すると、システム特性曲線が線分ア-イを通過するためには、領域Ⅰを通過する必要がある。
- 4) 以上から、代表的な漏洩箇所それぞれにおいて、システム特性曲線の 1 点でも領域Ⅰ (可燃性ガス濃度 1%以下において、1 分以内でシステムが安全に停止する領域) に存在することを示せばよい。また、以上の考察の逆を考えれば、領域Ⅳに 1 点でも通過点があることを示されれば、代替手法が有効であるとは言えない。
- 5) メーカー規定の定格時のガス流量を漏洩させても可燃性ガス濃度が 1%未満となるケースも想定されるが、これは「パッケージ換気量が十分に大きく滞留しない構造となっている」といえることから、可燃性ガス検知器は不要であると考えられる。但し、実際には可燃性ガスが大量に漏洩すればシステムは燃料不足により運転を継続することができず、いずれは停止する。



図Ⅲ2.2.1.1.2.2-1 システム特性曲線



図Ⅲ2.2.1.1.2.2-2 予備測定結果 (システム特性曲線)

③データ収集方法

①で述べた検証ロジックに基づくと、代替手法による PEFC システムの停止時間と実際の可燃性ガス濃度を実機 PEFC システムで確認する必要がある。このため、データ収集

として、ある可燃性ガス漏洩流量における PEFC システムの停止時間を測定する「ガス漏洩試験」（ガス漏洩量とシステム停止時間を測定）とその際の可燃性ガス濃度を測定する「可燃性ガス濃度確認試験」（ガス漏洩量と可燃性ガス濃度を測定）の2段階で試験を行うこととした。

ここで、可燃性ガス濃度の測定において、実際の可燃性ガスをパッケージ内に漏洩させると試験時の安全上の問題があることから、可燃性ガスの代替ガスとしてヘリウムを使用することとした。なお、ヘリウムガスを使用するに当たって、予備的なシミュレーション検討で、ヘリウムガスは可燃性ガス（改質ガス、オフガス）よりも安全サイドの評価になることを確認している。

(3) データ収集方法の検討

① ガス漏洩試験

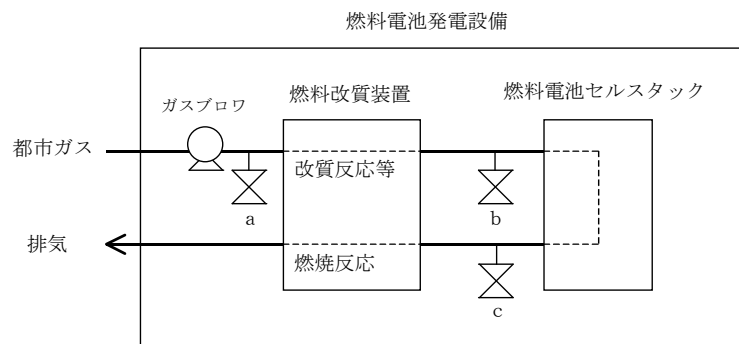
1) ガス漏洩方法

プロセス系経路にガスサンプリングポートを設置し、可燃性ガスを漏洩させる。

【サンプリングポート設置箇所の例】

b 点：プロセスガス系統 燃料改質装置（改質器、CO 変成器、CO 除去器）出口

c 点：プロセスガス系統 燃料電池セルスタック出口



図Ⅲ2.2.1.1.2.2-3 可燃性ガスの漏洩箇所

*a 点は都市ガス配管であり信頼性が高く、また付臭がされていることから本試験の対象外とする。

2) 試験条件

a) PEFC システムが定格運転にて 30 分以上経過していることを確認する。

b) サンプリングポートを開け、可燃性ガスをプロセス系外に漏洩させる。

c) 漏洩を開始してからシステムが停止するまでの時間（漏洩を検知できない場合は最長 30 分間まで）保持する。

なお、可燃性ガスを十分にプロセス系外へ漏洩させることが出来ない場合は、定格時の可燃性ガス流量を上限として、吸引ポンプ等を使用して強制的に漏洩させる。

3)測定項目

- ・測定項目：炎検知温度もしくはフレイムロッド電流、燃料改質装置各部の温度、流量、圧力、燃料電池セルスタック電圧
- ・測定周期：1秒周期

②ガス検知器周辺での可燃性ガス濃度確認試験

1)濃度確認方法

「①ガス漏洩試験方法」のガス漏洩箇所近傍で外部から配管供給するヘリウムガスをパッケージ内に漏らし、可燃性ガスの漏洩を模擬する。

- a)ヘリウムガス流量ヘリウムガス配管の途中に取付けた流量計にてヘリウムガス流し込み流量を測定する。
- b)ヘリウム濃度

可燃性ガス検知器の検知部、パッケージ換気口出口にヘリウムガス採集管を設置するか、シリンジ等を用いて各部のガスをサンプリングし、ヘリウム濃度をガスクロマトグラフにて分析する。採集管は固定し、閉切り用のコックを設けるとともに、機器パネルの配管貫通部は内部の換気が漏れないようにシールする。

2)試験条件

- a)PEFCシステムが定格運転にて30分以上経過していることを確認する。
- b)ヘリウムガス閉切り用のコックを徐々に開け、「①ガス漏洩試験方法」のガス漏洩箇所近傍にヘリウムガスを流し込む。このときのヘリウムガス流量は「①ガス漏洩試験方法」で設定した漏れ量とする。
- c)流し込み開始後、「①ガス漏洩試験方法」で可燃性ガス検知器の代替機能が、漏洩を検知し停止するまでの時間経過した時点で、可燃性ガス検知器の検知部、パッケージ換気口出口のガスをサンプリングし、ガスクロマトグラフでヘリウム濃度を測定する。
- d)ヘリウム濃度に漏洩ガスの可燃性ガスの割合を乗じて、可燃性ガス濃度を算出する。

③判定方法

パッケージに既設の可燃性ガス検知器が動作する前（検知部の可燃性ガス濃度が爆発下限界の1/4以下で60秒以内）に、ガス検知器代替手法が有効に動作すること。または、可燃性ガスを全量漏洩しても可燃性ガス濃度が1%以下であること。

(3) データ収集の実施

今回検討したデータ収集方法で、今回検討した検証ロジックに従って、代替手法の有効性の検証に必要なデータが過不足なく収集できていることを確認できた。

なお、漏洩箇所のb点（改質器出口）、c点（スタック出口）ともに検証ロジックを満たすことが確認できたのは4社であった。

(4) 評価方法の検討

可燃性ガスの流量の測定については、石鹼膜流量計や膜式流量計などの適用が考えられ

るが、電気出力によって流量に大きな違いが有り、それぞれの PEFC システムに最適の測定方法があると考えられることから、流量計の種類は特に限定しないこととした。

また、ヘリウム濃度から可燃性ガス濃度への換算方法として、「ガス漏洩試験」で漏洩させた改質ガス・オフガスの流量と同じ流量のヘリウムを「可燃性ガス濃度確認試験」で流し、得られたヘリウム濃度に改質ガス・オフガス中の可燃性ガスの割合を乗じて可燃性ガス濃度とした。

2.2.1.1.2.3 電磁両立性試験

(1) 目的

PEFC から発生する放射妨害について評価する試験方法を提供する。

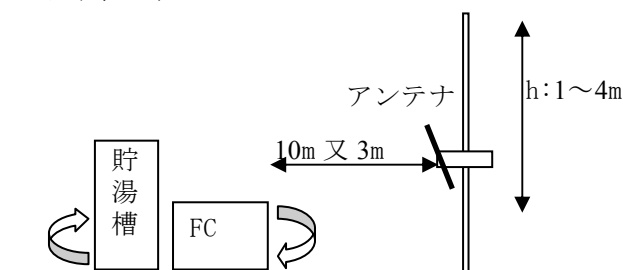
(2) データ収集方法の検討

①データ収集方法

- 1) 燃料電池システムの交流出力電源ポートは、擬似電源回路網を介して交流電源に接続する。電源ケーブルが製造業者の取扱説明書で指示されている場合、それに従った 1 m の長さのケーブルで供試装置と擬似電源回路網とを接続する。
- 2) 燃料電池システムは、製造業者の取扱説明書の指示のとおり、端末処理されたケーブルと接続する。
- 3) 燃料電池システムが定格出力にて運転している状態で実施する。
- 4) 交流電源は、定格電圧及び定格周波数で運転する。
- 5) 周波数範囲 30 MHz から 1 000 MHz では、測定は、準尖頭値検波器付き受信機で行う。放射妨害の測定は、供試燃料電池システムの境界から規定された距離で行う。

注 1) アンテナは CISPR 16-1、第 2 節の 15. の要求事項に準拠する。

- ・アンテナとの距離：10m
- ・アンテナ高さ：1～4m
- ・アンテナ偏波：水平、垂直



図Ⅲ2.2.1.1.2.3-1 放射妨害測定例

②評価基準

表Ⅲ2.2.1.1.2.3-1 放射妨害限度値

周波数範囲 (MHz)	クラス A (工業環境) (IEC61000-6-4)	クラス B (住宅・商用・軽工業環境) (IEC61000-6-3)
	準尖頭値 (μ V/m)、at10m	準尖頭値 (μ V/m)、at10m

30-230	40dB	30dB
230-1000	47dB	37dB
備考1. dB ($\mu\text{V}/\text{m}$) は、1 μV を 0 dB としたときの値。		
2. 周波数の境界では、限度値の小さい値を適用する。		

*参考 CISPR 22 の 11.2.1 抜粋

(3) データ収集の実施

①システムの試験結果

放射妨害測定では、規定の周波数範囲を尖頭値（ピーク値）で測定し、その結果から準尖頭値で測定する周波数領域を絞り込み、絞り込んだ周波数領域にて準尖頭値の最大値を確認した。この結果、供試体 A の放射妨害波電界強度は 60Hz モードでは定格運転時が最大であったものの、50Hz モードでは 75%負荷運転時が最大であった。しかし、試験データの誤差範囲が $\pm 3\text{dB}$ であり、有意差と認められない。また、供試体 B については、定格運転時が最大であった。なお、供試体 B については、停止時の強度が定格運転時の強度とほぼ同等であった。②で述べるように、パワーコンディショナ単体ではこのような現象が見られず、パワーコンディショナ以外からも放射妨害が生じていることが推測されるが、停止時のみに作動する補機はなく、その発生源は不明であった。

②パワーコンディショナ単体の試験結果

PEFC 供試体のシステムではなく、パワーコンディショナ単体で試験できないか検討することを目的とし、システムと同様の手順にて、アンテナとの距離 10m でパワーコンディショナ単体（筐体内取付け状態）の測定を行った結果、全体としてパワーコンディショナ単体のほうがシステムよりも放射妨害電界強度が高くなった。この要因の一つとして、筐体外からパワーコンディショナへ DC 電力を供給しているため、その配線にシールドを施しているものの、配線等からの妨害波が影響してシステムよりも電界強度が高くなったものと考えられる。

③アンテナとの距離の影響の評価結果

アンテナとの距離 3m における測定の結果と、前述したアンテナとの距離 10m における測定結果と比較すると、測定値が一致していないことが分かった（10m の場合の結果と一致すれば 0dB となる）。

(4) 評価方法の検討

PEFC システムの出力条件として、測定誤差の範囲内で定格運転状態での放射量が最も大きく、定格運転状態で測定すれば放射量の評価ができることが分かった。

また、パワーコンディショナ単体（外部電源から DC 電力を供給しパッケージ内のパワーコンディショナのみを運転）での測定について、直流電源等からのノイズ対策に課題があるため、システムとして評価すべきであることが分かった。但し、今後ノイズ源を特定でき、それに対する対策が施されるようになればパワーコンディショナ単体での評価ができる可能性もある。さらに、アンテナとの距離が 3m の場合も検討したが、測定値の補正方法

に課題があるため、CISPR22 で規定されているように、10m を基本とすべきであることが分かった。

2.2.1.1.3 普及拡大のためのデータ収集

2.2.1.1.3.1 耐久性評価試験

(1) 目的

家庭等に設置した場合の PEFC システムに求められる耐久性を評価するための試験方法を検討する。特に、こういった指標値が耐久性評価に有効かなどについて検討をおこなった。

(2) データ収集方法の検討

① データ収集方法

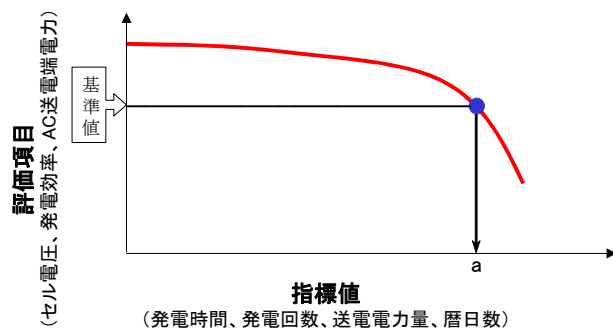
- 1) 模擬電源装置、模擬負荷装置を準備し、所定の位置に接続・設置する。また貯湯ユニットが満蓄停止する事の無いよう、自動給湯装置やラジエータ等を準備する。
- 2) 発電時間で 100 時間相当のサイクル毎に、定格到達後 30 分経過後から 3 時間のデータを用いて発電効率を算出する。発電効率が初期値から 10%低下するまで、表Ⅲ2.2.1.3.1-1 の運転ケースを繰り返す。

表Ⅲ2.2.1.1.3.1-1 運転ケース及びデータ収集方法

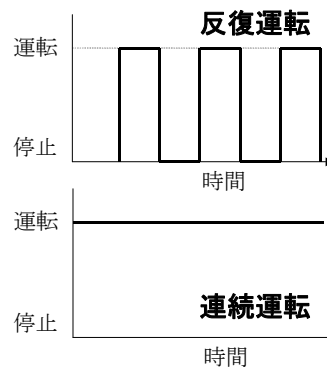
	運 転 ケ ー ス	運 転 方 法 及 び デ ー タ 収 集 方 法
1	定 格 連 続 試 験	運 転 方 法 : 起 動 指 令 → 定 格 出 力 → 停 止 指 令 ----- デ ー タ 収 集 方 法 : 停 止 指 令 2 時 間 後 に 起 動 指 令 に よ り 起 動 し、定 格 出 力 で 運 転 す る。起 動 指 令 100 時 間 後 に 停 止 指 令 に よ り 停 止 す る。以 下、発 電 時 間 1500 時 間 到 達 ま で 繰 り 返 す。1500 時 間 到 達 後 は 運 転 ケ ー ス 2 へ 移 る。
2	定 格 起 動 停 止 試 験	運 転 方 法 : 起 動 指 令 → 定 格 出 力 → 停 止 指 令 ----- デ ー タ 収 集 方 法 : 停 止 指 令 2 時 間 後 に 起 動 指 令 に よ り 起 動 し、定 格 出 力 で 運 転 す る。起 動 指 令 10 時 間 後 に 停 止 指 令 に よ り 停 止 す る。以 下、発 電 時 間 1500 時 間 到 達 ま で 繰 り 返 す。1500 時 間 到 達 後 は 運 転 ケ ー ス 3 へ 移 る。
3	最 低 負 荷 連 続 試 験	運 転 方 法 : 起 動 指 令 → 最 低 出 力 → 停 止 指 令 ----- デ ー タ 収 集 方 法 : 停 止 指 令 2 時 間 後 に 起 動 指 令 に よ り 起 動 し、最 低 出 力 で 運 転 す る。起 動 指 令 100 時 間 後 に 停 止 指 令 に よ り 停 止 す る。以 下、発 電 時 間 1500 時 間 到 達 ま で 繰 り 返 す。1500 時 間 到 達 後 は 運 転 ケ ー ス 1 へ 移 る。

② 判定方法

図Ⅲ2.2.1.1.3.1-1 に示すように、「指標値」に対して「評価項目」の経時変化をプロットした場合、(評価項目ごとの) 基準値を下回る時点での指標値 a を (その指標値に対する) 耐久性と定める事を考えた。図Ⅲ2.2.1.1.3.1-2 に示すように、試験を行う「運転パターン」を加えて、これら 3 者の関係を試験により確認した。



図III 2.2.1.1.3.1-1 耐久性の考え方



図III 2.2.1.1.3.1-2 運転パターン

(3) データ収集の実施

データ収集結果を表III 2.2.1.1.3.1-2 に示す。試験場所でのユーティリティ関連の不具合が数回発生したが、両 PEFC 供試体とも、システムには大きなトラブルは発生せず、当初計画どおりの運転を完了した。

表III 2.2.1.1.3.1-2 データ収集状況

	供試体A	供試体B
設置	平成17年12月	平成18年02月
試験開始	平成18年01月	平成18年03月
試験終了	平成19年10月	平成19年09月
累積発電時間	約9,800時間 (追加検証含む)	約8,800時間 (3パターン×2サイクル)
累積発電回数	407回 (追加検証含む)	391回
備考	ユーティリティ不具合あり (断水、停電、ガスメーター故障)	ユーティリティ不具合あり (電圧上昇、接地抵抗絶縁不良)

今回設定した3つの試験パターンそれぞれについて、各評価指標に対する影響度合の違いを調べたところ、各運転パターンと指標値とは明確な相関が見られないことがわかった。即ち、同一の試験パターンであっても、1サイクル目と2サイクル目とで特定の指標値の劣化傾向に違いが見られるなど、明確な相関が確認できていない。これは、初期劣化の影響や、外気温、水温など外部条件の違いなどが要因の一つであると思われる。

(4) 評価方法の検討

今回取得したデータの中では、メーカーによる傾向の違いがみられなかった「発電効率」を耐久性評価項目とみなせる可能性があると考えられる。ただし、今回の試験結果をみると発電効率が10%低下した後も発電出力が初期値と変わっていない。従って、本指標値をもって真のシステム耐久性を定義付けるとまでは言い切れない可能性がある。現時点においては、あくまでも耐久性に関係した「指標値」として捉えるべきと判断する。

2.2.1.1.3.2 寒冷地性能評価試験

(1) 目的

特に寒冷地は熱需要が大きいため燃料電池システムの導入効果が大きく、寒冷地仕様として開発されている PEFC システムが、凍結や機器故障を発生させることなく起動・運転・停止できるか確認する耐寒性能（寒冷地仕様であることを明記する際の根拠とする）について評価する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.1.3.2-1 RF式に関するデータ収集項目

	屋内設置 FF 式	屋外設置 RF 式
試験内容	発電試験	・発電試験 待機試験 停電試験
計測/確認項目	<ul style="list-style-type: none"> ・発電試験で異常なき事 ・給排気部の温度 ・給排気トップ周辺の着氷状況 ・給気によって温度低下が懸念される箇所 	<ul style="list-style-type: none"> ・発電、停止待機、停電中の各試験に異常なき事 ・製造業者の指定する耐寒性能上懸念されるシステム内部温度（例：電子基盤、スタック、脱硫器、FPS、冷却水ポンプ、燃焼エアブロウ、冷却水系イオン交換樹脂塔、ドレン水筐体配管、温水循環系配管等） ・給排気部の温度 ・排気口周辺の着氷状況 〔発電効率（燃料消費量、発電出力：ヒーター等による低下確認）〕※ ・〔排熱回収（低温による低下確認）〕※

※安全性評価の際には不要な項目（性能評価時には必要）

②データ収集方法

1) 発電試験（FF式、RF式）

- a) 燃料電池発電ユニットを指定の温度になるように設置環境を整え、製造業者が指定する要領で設置する。（FF式においては給排気延長最大、曲がり最大数とすること）
- b) 各種データ収集のための測定機器を、所定の位置に接続・設置し、データ収集の準備をする。熱電対は、測定対象の表面に密着させて設置する。
- c) 運転方法は、「冷起動→最低負荷発電（3時間）→定格発電（3時間）→通常停止（停止工程終了まで）」とする。
- d) 起動操作10分前から測定を開始し起動から発電開始までと、最低負荷運転と定格出力運転をそれぞれ到達後3時間維持する。その後通常停止操作においても、凍結の恐れがある部分が平衡温度に達するまで測定する。

2) 待機試験（RF式のみ）

- a) 発電試験の（1）（2）と準備は同様。
- b) 試験時間は最大5時間とする。ただし、機器内部の温度低下が1時間以上平衡状態になったことを確認した場合は終了とする。

3) 停電試験 (RF式のみ)

a) 発電試験のa)およびb)と準備は同様。

b) 停止している状態で電源の供給を断ち、凍結の恐れがある部分が0℃に達するまで測定する。試験時間は最大1時間とする。

③ 判定方法

1) 発電試験

起動時、各運転ケース、停止行程時の測定期間について、各収集データが規定の許容範囲内かつ製造業者の設計範囲内であり、異常停止や排気部の凍結、外観異常もなく安全に運転及び停止すること。

また、定期的に排気トップの先端の状況を観察し、排気ドレンが着氷しないか状況を記録する。着氷が生じる場合は、氷の成長状況と排気トップの閉塞状況を観察し、閉塞に至った場合には安全に停止することを確認する。

2) 待機試験並びに停電試験

各収集データが製造業者の設計許容温度範囲内であり、凍結等による破損の無きことを確認する。

(3) データ収集の実施

屋内設置のFF式について、上記データ収集方法に従って、実機データ収集（給排気筒延長3m、3曲り、外気温度-15℃、無風）を実施した結果から、データ収集すべき項目について、過不足なくデータ収集できていることが確認できた。

(4) 評価方法の検討

① 発電試験

運転方法としては最低負荷時が条件的に厳しいことが確認できたため、冷起動状態から最低負荷状態を経て定格状態まで達することができるかどうかを確認することとした。具体的には、「冷起動→最低負荷発電（3時間）→定格発電（3時間）→通常停止（停止工程終了まで）」とした。

② 待機試験並びに停電試験

屋外設置式（RF式）の寒冷地仕様機については、発電中のみならず、停止中での耐寒性能が重要な要素となる。具体的には、燃料電池システム内部の保温ヒーター等が動作可能な「待機試験」と、電力系統事故等により保温ヒーター等の動作ができない「停電試験」とを、RF式に特有の試験とした。また、待機試験での保持時間は最大5時間、停電試験での試験時間は最大1時間とすることなど、試験条件をまとめた。

2.2.1.1.4 成果の活用

(1) 安全性評価試験方法の検討

多様な PEFC 供試体を調達し、PEFC システムの安全性に関するデータ収集を実施して、平成 18 年度までに安全性試験に関する検討を完了した。

これらの成果を公的委員会「小規模燃料電池保安技術検討委員会」（事務局：社団法人日本電気協会）や規制当局に提供し、規制再点検の議論に活用された。

出力 10kW 未満で常圧型(燃料ガスを通ずる部分の圧力 0.1MPa 未満)の PEFC システム過圧防止装置省略時の安全性試験の検討の際に得られたデータは、過圧防止装置の省略に関する規制適正化を検討していた「小規模燃料電池保安技術検討委員会」（事務局：社団法人日本電気協会）に提供した。平成 18 年 3 月 15 日に本委員会における審議が完了し、一定の要件を満たす PEFC システムに関して、過圧防止装置を省略しても安全性を確保できるとの結論が出された。これを受けて、平成 18 年 10 月 27 日に電気事業法関連法規の条文改正がなされた。

可燃性ガス検知器省略に関しては、経済産業省殿から、現状の条文においても「可燃性ガス検知器の代替手法の適用を否定していないため、条文改正は不要であり、可燃性ガス検知器を省略しても安全であると判断した根拠をメーカーが保有していればよい」との見解をいただいた。なお、可燃性ガス検知器を省略しても安全であると判断するための根拠とするための統一の物差しとなる試験方法を標準化しておく必要があるとの判断から、可燃性ガス検知器省略時の安全性評価試験の作成を実施した。

EMC 試験については、小形 PEFC システムの JIS 制定案作成に活用された。

(2) 普及拡大のためのデータ収集

耐久性評価試験については、システムでの試験結果、ならびにシステム試験終了後に実施したセルスタックの調査結果を、「固体高分子形燃料電池スタックの劣化解析基盤研究」事業に提供し、加速劣化などの検討に役立てられた。本件は、同事業で平成 19 年度までの事業成果をまとめた報告書にも記載された。

また、耐寒性能試験については、燃料電池の新しい設置形態として今後の普及拡大が期待される寒冷地仕様機に求められる要素を、性能試験の形にまとめたものである。本件については現状、IEC/TC105 で定める国際標準においても対応する記述が無く、国際標準に先んじて検討をおこなったという位置付けである。

2.2.1.2 次世代型燃料電池に係わる基準・標準化対応

2.2.1.2.1 固体酸化物形燃料電池に係わる基準・標準化検討

2.2.1.2.1.1 供試体の調達

定置用で小形(発電出力 10kW 未満、最高使用圧力 0.1MPa 未満)の SOFC システムについて、国内及び海外のメーカーの開発状況を調査した結果を踏まえて、データを収集する SOFC システムの供試体(以下、SOFC 供試体と示す)の選定を行った。選定した SOFC 供試体の外観を図 III.2.2.1.2.1.1-1 に示す。なお、上記 SOFC 供試体はいずれもコージェネレーション仕様のものである。上記の SOFC 供試体は JIA 東京事業所に設置した。



京セラ



住友精密工業／東邦ガス



アキュメントリクス
／新日鉄エンジニアリング



TOTO



HEXIS AG／ヒラカワガイドム



日本特殊陶業

図Ⅲ2.2.1.2.1.1-1 SOFC 供試体の外観状況

2.2.1.2.1.2. 安全性評価試験の検討

2.2.1.2.1.2.1 試験項目の選定

通常運転時において火災や火傷等の危険がないかどうか、また燃料電池の内部や外部で異常が発生したときに、安全に停止動作等に移行できるかどうか、という観点から、以下に示す7項目の試験を抽出した。

- 設置離隔距離検討のための試験
- 高温部における安全性試験
- 燃料遮断試験
- 制御電源異常時の安全性試験
- 制御機能喪失時の安全性試験
- 漏洩電流限度試験
- 停電試験

また、電気事業法関連の規制再点検をおこなう公的委員会「小規模燃料電池保安技術検討委員会」や、経済産業省殿からの指摘などにもとづき、以下に示す5項目の試験も併せて抽出した。

- 不活性ガス置換省略時の安全性試験
- システム内部の安全性試験
- 排ガスの安全性に関する試験
- 改質ガス漏洩時の安全性評価試験
- 過圧防止装置省略時の全性能試験

これら 12 項目の試験について、実機データ収集結果を踏まえた試験手法の見直しなどをおこない、安全性評価試験方法としてまとめた。

以下、上記各試験項目について、それぞれ具体的に記述する。

2.2.1.2.1.2.2. 不活性ガス置換省略時の安全性試験

(1) 目的

不活性ガスパージ実施時、不活性ガスパージ省略時、及び性能維持措置等の実施時における運転データを収集し、不活性ガスパージを省略した場合の安全性を評価する試験方法を提供する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.2-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
燃料の瞬時流量、窒素ガス流量、燃料昇圧器出口圧力、脱硫器温度、改質器温度、セルスタック（温度・電圧）、パッケージ表面温度、発電ユニット内部のガス組成（H ₂ 濃度、CO 濃度、CH ₄ 濃度、O ₂ 濃度、N ₂ 濃度）、周囲大気温度	パッケージ表面温度の許容値： 140℃以下 ^{※1} 周囲大気温度：5～35℃ ^{※2}

※1：JIS S 2122（家庭用ガス暖房機）の「操作時に手を触れおそれのある部分の表面温度」の規定による。

※2：試験室の温度条件、JIS Z 8703（試験場所の標準状態）に準ずる。

②データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.2-2 の各運転ケースについて、表Ⅲ2.2.1.2.1.2.2-3 及び図Ⅲ2.2.1.2.1.2.2-1 のデータ収集方法に従い、表Ⅲ2.2.1.2.1.2.2-1 に記載のデータを収集する。なお、これらの条件は PEFC システムでデータ収集を行った条件と同じである。

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.2-2 運転ケースと不活性ガスパージ方法等の詳細

No.	パージ方法	パージ方法の詳細
1	不活性ガスパージ実施	現行基準（火技省令第 35 条）に準じた不活性ガスパージを行う。 不活性ガス：窒素、二酸化炭素など ※窒素・水素混合気などの可燃性ガスを含むガスは不可
2	不活性ガスパージ省略 （性能維持措置等異常） ^{※1} 時	不活性ガスパージを実施しない（性能維持措置を動作させない）状態を人為的に作り出し、不活性ガスパージ省略時の安全性を検証する。
3	性能維持措置等 ^{※2} 実施時	不活性ガス以外の性能維持措置（代替パージ手法）等を実施する仕様の場合は、これを実施する。

※1：不活性ガスパージ省略方法の例

ポンプ、ブロワの強制停止、可燃性ガス通路等の締め切り弁を強制開放、など

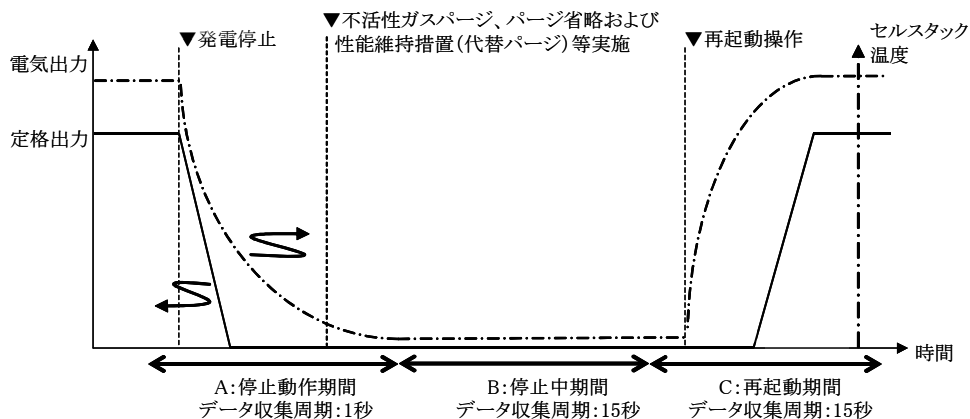
※2：性能維持措置等の実施例

不活性ガス以外のガス（空気、水蒸気など）によるパージ、可燃性ガス通路等の締め切り等

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.2-3 SOFCシステムの状態とデータ収集期間・測定周期

記号	システム状態	システム状態の詳細及びデータ収集期間	測定周期
A	停止動作期間	定格発電にてパッケージ表面温度が安定 ^{※1} し、1時間経過してから停止操作を行い、表2に示す各パージ方法によりシステム停止に至るまで。（停止操作開始10分前から、パージ実施後1時間経過するまで）	1秒
B	停止中期間	パージ実施によるシステム停止から、次の起動までの間。（停止動作期間終了後、12時間以上）ただし排ガス組成の分析は、停止動作期間終了後3時間とする。	15秒
C	再起動期間	12時間以上の停止中期間に続き、再起動操作から定格発電状態に移行するまで。（再起動操作開始10分前から、定格発電状態到達後、パッケージ表面温度が安定するまでの期間）	15秒

※1：「温度が安定」とは、温度上昇が30分間あたり0.5℃以下になった状態とする。



図Ⅲ2.2.1.2.1.2.2-1 SOFCシステムの運転状態

③判定方法

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.2-2に示す各運転ケースについて、停止動作期間から再起動期間が終了するまでの状態における各収集データが規定の許容範囲内かつ製造業者の設計範囲内で、外觀異常もなく安全に停止及び再起動することとした。

(3) データ収集の実施

不活性ガスパージ実施時、省略時及び、性能維持措置として空気パージ実施時について、停止動作期間における運転データを確認した結果、全データ収集項目について目的としたデータが取得できていることを確認した。また、不活性ガスパージ省略時と性能維持措置

実施時の各ケースについて、SOFC システム内部の温度や圧力、排ガスのデータ推移は、不活性ガスパージ実施時と同様な変化を示し、安全上の問題なく停止及び再起動できることを確認した。

(4) 評価方法の検討

今回検討したデータ収集方法で、性能維持措置を含む不活性ガスパージの省略時の安全性について、適切に評価できることが確認された。

2.2.1.2.1.2.3 設置離隔距離試験

(1) 目的

燃料電池パッケージからの輻射熱により、燃料電池パッケージ周辺の建物壁など、可燃物の温度が異常に上昇しないことを確認するための試験方法を提供する。

(2) データ収集方法の検討

① データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.3-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
燃料の瞬時流量、ガス閉止弁表面温度、燃料昇圧器出口圧力、改質器温度、セルスタック（温度・電流・電圧）、パッケージ表面温度（天井面、背面、側面、前面及び床面）、周囲木壁温度（天井面、背面、側面、前面及び床面）、周囲大気温度	ガス閉止弁表面温度：85℃以下 ^{※2} パッケージ表面温度：95℃以下 ^{※3} 周囲木壁温度：100℃以下

※1：貯湯槽に熱源機が備わるものについては、その筐体についてJIS S 2109の温度上昇試験を適用する。

※2：85℃以下または耐熱試験によるガス通路の気密の項に適合し、かつ操作に支障なきことが確認された温度以下

※3：発電用火力設備の技術基準の解釈の「燃料電池の構造」の温度規定による。

② データ収集方法

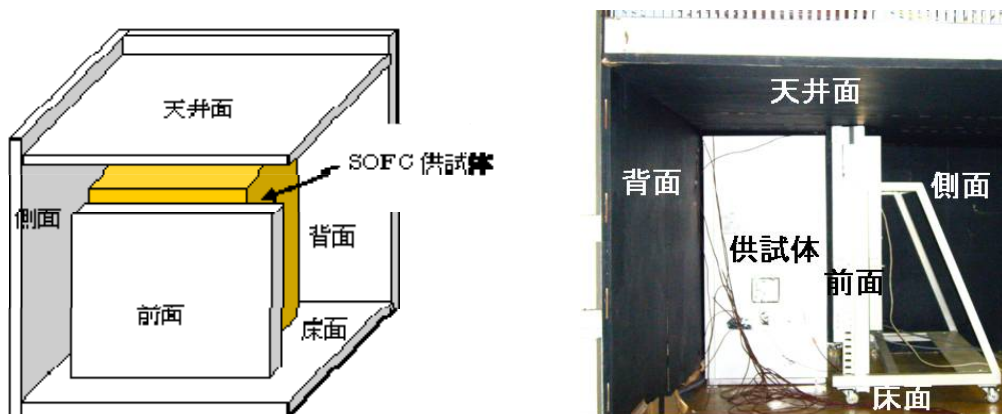
1) SOFC 発電ユニットを、周囲木壁（測温板 図 3.1.2.3-1 参照）と SOFC 発電ユニットの離隔距離が製造業者の指定する距離となるように、製造業者が指定する要領で設置する。ここで離隔距離は、製造業者の指定が無い場合は原則としてパッケージ外面から 10mm の距離とし、測温板の仕様は JIS S 2109（家庭用ガス温水機器）に従うこととする。

2) 表Ⅲ2.2.1.2.1.2.3-2 の 2 つの運転ケースにおいて、同じく表Ⅲ2.2.1.2.1.2.3-2 に記載のデータ収集方法に従って温度を測定する。ここで各データの測定周期は、通常運転ケースについては起動開始から通常停止完了まで常に 15 秒としたが、強制高温運転ケースについては異常発生操作開始 10 分前から異常停止後 3 時間までは過渡的な変化を的確に捉えるために 1 秒、その後の変化は緩慢であることから 15 秒とした。

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.3-2 運転ケースとデータ収集方法

	運転ケース	運転方法及び測定方法
1	正常運転ケース	運転方法：冷起動→定格発電→通常停止操作→通常停止 測定方法： 起動操作 10 分前から測定を開始し、定格発電にて木壁面の温度が安定してから 3 時間経過後、通常停止操作を行って、セルスタックの温度が 100℃ 以下となるまで測定する。
2	異常運転ケース（強制高温運転）	運転方法：定格発電→異常運転（強制高温運転）操作※1→異常停止 測定方法： 定格発電にて木壁面の温度が安定してから 1 時間経過後、異常運転操作を行う。データは異常運転操作 10 分前から、異常停止後 12 時間測定する。ただし排ガス分析は、異常発生操作 10 分前から異常発生後 3 時間までとする。

※1: 正常運転ケースと比較し、より高温状態を引き起こすと考えられる異常運転操作とは、例えば燃料利用率を人為的に低下させたり、オフガス燃焼量を強制的に増加させることである。



図Ⅲ2.2.1.2.1.2.3-1 設置離隔距離試験方法における測温板の配置

③判定方法

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.3-2 に示す各運転ケースのデータ収集期間において、表Ⅲ2.2.1.2.1.2.3-1 に示す各収集データが規定の許容範囲内かつ製造業者の設計範囲内であり、外観異常もなく安全に運転及び停止すること。

(3) データ収集の実施

通常運転ケースと異常運転ケースそれぞれについて、周囲木壁（最高 62.3℃）、パッケージ表面（最高 66.5℃）の温度が許容値（表Ⅲ2.2.1.2.1.2.3-3 参照）の範囲内であることを確認した。なお、今回調達した全ての SOFC 供試体についても同様に、目的としたデータが取得できており、また各温度が許容値の範囲内であった。

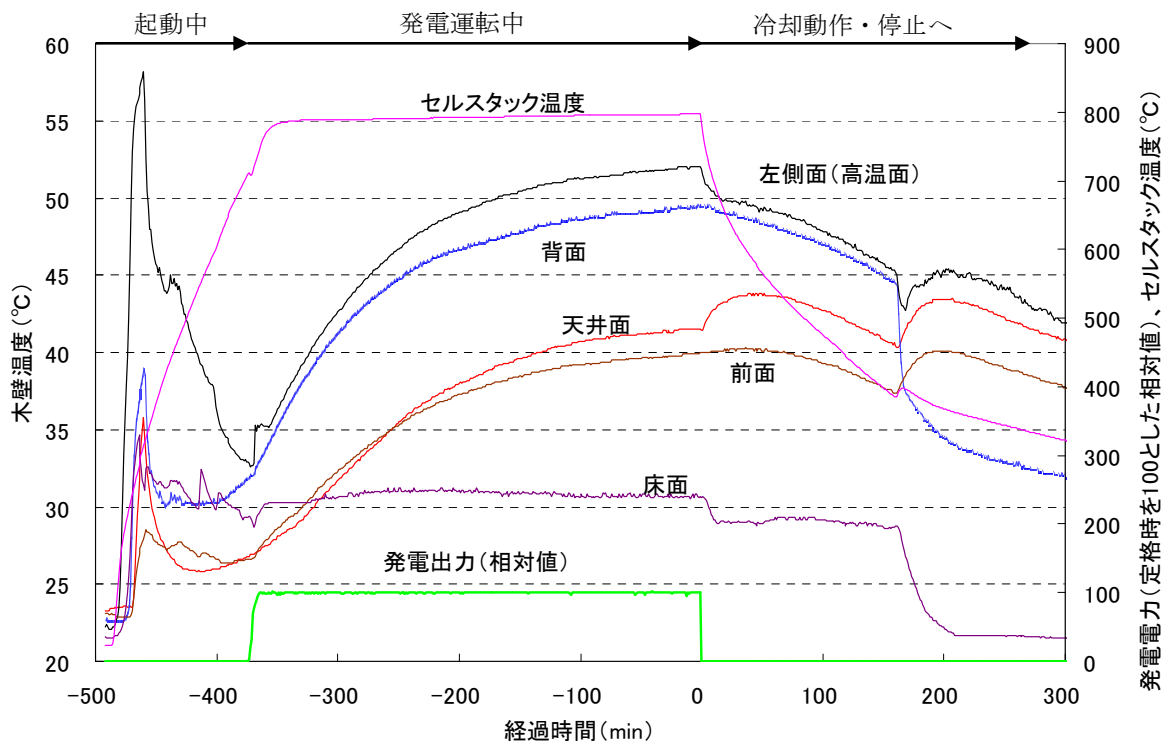
また図Ⅲ2.2.1.2.1.2.3-2 に通常運転ケースについてデータ収集した一例をそれぞれ示す。図の横軸は経過時間であるが、停止操作時をゼロとしている。

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.3-3 試験結果の一例

	測定点	定格到達後の最高温度 (°C)		許容値
		正常運転ケース	強制高温運転ケース	
パッケージ表面	天井面	49.5	66.5	140°C ^{*1} (操作部は 60°C)
	背面	47.1	53.9	
	右側面	51.8	53.2	
	左側面	55.6	62.6	
	前面	48.4	51.1	
	床面	—	26.9	
周囲木壁	天井面	43.8	53.3	・正常運転ケース 100°C ^{*2} ・異常運転ケース 135°C ^{*2} (室温 35°C基準)
	背面	49.5 ^{※4}	57.2	
	右側面	38.0	43.0	
	左側面	52.0 (58.2)	62.3	
	前面	40.3	52.0	
	床面	31.2 (34.7)	37.6	
参考	排気温度	68.4	53.2	260°C
	セルスタック温度	797.4	836.0	—
	大気温度	20.8	24.9	—

※1： JIS S 2109(家庭用ガス温水機器)の「操作時に手を触れるおそれがある部分の表面」温度の規定による

※2：「対象火気設備等及び対象火気器具等の離隔距離に関する基準」の規定による



図Ⅲ2.2.1.2.1.2.3-2 データ収集結果の一例 (通常運転ケース、周囲木壁温度など)

(4) 評価方法の検討

今回検討したデータ収集方法で、SOFC システムの設置離隔距離を評価できることが確認された。

2.2.1.2.1.2.4 制御機能喪失時の安全性試験

(1) 試験方法検討の目的

システムが制御機能を失った場合における燃料電池の挙動や、燃料電池コージェネレーションシステム全体としての挙動を把握し、安全性を確認する試験方法を提供する。

なお、ここでは制御機能喪失の実施手法として、ウォッチドッグタイマの出力を停止させることによる通信異常を例とする測定方法を記載するが、これと同様な状態を模擬できれば、制御機能喪失の実施方法はこの例に限定されない。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.4-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
燃料の瞬時流量、燃料昇圧器出口圧力、改質器温度、セルスタック（温度・電流・電圧）、パッケージ表面温度、ウォッチドッグタイマ出力、周囲大気温度	ウォッチドッグタイマ出力：オシロスコープでの測定周期は 1ms

②データ収集方法

1) 表Ⅲ2.2.1.2.1.2.4-2の運転ケースについて、同じく表Ⅲ2.2.1.2.1.2.4-2のデータ収集方法に従って表Ⅲ2.2.1.2.1.2.4-1に記載のデータを収集する。なお、各データの測定周期は、異常発生操作開始10分前から異常停止後3時間までは過渡的な変化を的確に捉えるために1秒、その後の変化は緩慢であることから15秒とする。

2) データ収集後に、目視等により外観異常等が無いことを確認する。

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.4-2 運転ケース及びデータ収集方法

運転ケース	運転方法及び測定方法
異常発生ケース（制御機能喪失）	運転方法：定格発電→異常発生（制御機能喪失）操作※1→異常停止 測定方法： 定格発電にて、パッケージ表面温度が安定してから1時間経過後、異常発生操作を行う。データは異常発生操作10分前から、異常停止後12時間測定する。 ただし排ガス分析は、異常発生操作10分前から異常発生後3時間までとする。

※1：制御機能喪失の異常発生操作は、次の手順で行うこととする。

- 1) ウォッチドッグタイマの出力を人為的に停止することにより、制御装置異常を模擬する。
- 2) 補機電源遮断後、（補機は動作しないようにした上で）制御用電源を再投入し、データ収集を継続する。

③判定方法

データが規定の許容範囲内、かつ製造業者の設計範囲内であり、外観異常もなく安全に停止すること。

(3) データ収集の実施

ウォッチドッグタイマ出力停止以外の異常操作方法でも御機能喪失状態を適切に模擬してシステム挙動を把握できることを確認した。また、本 SOFC 供試体は制御機能喪失してから数秒以内に、異常な温度上昇や圧力上昇などなく安全に停止することも確認された。

(4) 評価方法の検討

今回検討したデータ収集方法により、運転中に制御機能が喪失した場合の安全性について、ウォッチドッグタイマを有しない SOFC システムも含めて適切に評価を行なうことができた。

2.2.1.2.1.2.5 高温部における安全性試験

(1) 試験方法検討の目的

パッケージ内の温度が異常に上昇しないこと及び、インバーター等の電気部品が耐熱温度以上にならないことを確認することで、安全性を評価する試験方法を提供する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.5-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
セルスタック（温度）、セルスタック断熱材表面※1、改質器断熱材表面※1、パッケージ表面温度、点火装置表面温度、操作時に手を触れる部分の温度（起動・停止スイッチなど）、周囲大気温度、インバーター制御基板周辺温度、インバータースイッチング素子近傍	<ul style="list-style-type: none"> セルスタック断熱材表面温度：製造業者規定の耐熱温度以下であること（例えば 80℃） 操作時に手を触れる部分の温度（起動・停止スイッチなど）：60℃以下または 70℃以下 インバーター制御基板周辺温度：製造業者規定の耐熱温度以下であること（例えば 60℃）

※1：改質器とセルスタックが同一の断熱ケースに収納されている場合は、改質器断熱材表面温度とセルスタック断熱材表面温度を、一箇所で測定しても良い。

②データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.5-2 運転ケース及びデータ収集方法

	運転ケース	運転方法及び測定方法
1	正常運転ケース	運転方法：冷起動→定格発電→通常停止操作→通常停止 測定方法： 起動操作 10 分前から測定を開始し、定格発電にてパッケージ表面の温度が安定※6 してから 3 時間経過後、通常停止操作を行って、セルスタックの温度が 100℃以下となるまで測定する。

2	異常運転ケース (強制高温運転)	運転方法：定格発電→異常運転（強制高温運転）操作 ^{※1} →異常停止 測定方法： 定格発電にてパッケージ表面の温度が安定してから1時間経過後、異常運転操作を行う。データは異常運転操作10分前から、異常停止後12時間測定する。ただし排ガス分析は、異常発生操作10分前から異常発生後3時間までとする。
---	---------------------	--

※ 1：表Ⅲ2.2.1.2.1.2.3-2の強制高温運転と同じ。

③判定方法

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.5-2に示す各運転ケースの測定期間について、表Ⅲ2.2.1.2.1.2.5-1に示す各収集データが、規定の許容範囲内かつ製造業者の設計範囲内であり、外観異常もなく安全に運転及び停止すること。

(3) データ収集の実施

SOFC システムには、プロセス制御基板等を高温部と同一のパッケージ内に内蔵する発電ユニット内蔵型と、別パッケージの補機ユニット内に内蔵する補機ユニット内蔵型があるため、本検討では両方のタイプについて試験方法の妥当性を確認した。また、電気部品周辺温度は50℃以下であり、電気部品の仕様の点から、安全性に関する問題の無い範囲内に保たれて運転されることを確認した。

(4) 評価方法の検討

今回検討したデータ収集方法により、発電ユニット内蔵型、補機ユニット内蔵型ともに、適切に高温部の安全性を評価することができた。

2.2.1.2.1.2.6 漏洩電流限度試験

(1) 試験方法検討の目的

システムから漏洩する電流量を把握して、安全性を確認する試験方法を提供する。

(2) データ収集方法の検討

① データ収集項目

- 1) PEFC システムでの試験方法案を参考に測定項目の検討を行い、SOFC システムの定格発電中に SOFC システムの接地端子と大地間に1 k Ω の抵抗を含んだフィルター回路を接続し、表Ⅲ2.2.1.2.1.2.6-1に示す漏洩電流量及び参考データを測定することとした。
- 2) 漏洩電流値は特に試験時における湿度の影響を受けるため、試験室の温度及び湿度の条件は JIS Z 8703(試験場所の標準状態)に準ずることとした。

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.6-1 データ収集項目

測定項目	測定細目	測定機器	測定周期	許容値など
漏洩電流	フィルター回路の端子電圧 (漏洩電流)	電圧計	15 秒	フィルター回路の端子電圧 5V 以下または漏洩電流が 5mA 以下
参照温度・湿度	周囲大気温度 周囲大気湿度	温度計 湿度計		温度：5～35℃

②データ収集方法

- 1) 供試体の配管接続部分を絶縁性のものに換え、器体据付部を床面から絶縁する。
ただし、燃料電池本体と貯湯槽の間の循環ラインは、設置状況のままとする。
- 2) 供試体の接地端子と大地間に、1kΩの抵抗を含んだフィルター回路を接続する。
- 3) 燃料電池システムを起動し、定格発電到達から30分以上経過した後、排熱回収を行っている状態にて、表Ⅲ2.2.1.2.1.2.6-1に記載の各データを収集する。

③判定方法

太陽光発電システム用インバータの認証基準である「漏洩電流が5mA以下であること。または、フィルターの出力端子電圧が5V以下であること」のレベルが担保できるかを確認する。なお、直流発電部分と燃料配管が電氣的に絶縁されていることを考慮すれば、漏洩電流による燃料配管の腐食は起こり難いことから、上記基準を満足すれば十分安全性を担保できると考えられる。

(3) データ収集の実施

全データ収集項目について目的とするデータが取得できていることを確認した。また、今回調達したいずれのSOFCシステムにおいても、太陽光インバータに対する認証基準のレベルが担保できることを確認した。

(4) 評価方法の検討

今回検討したデータ収集方法により、適切にSOFC供試体の漏洩電流を評価することができた。

2.2.1.2.1.2.7 燃料遮断試験

(1) 目的

燃料の供給に異常が起きた場合における燃料電池発電ユニットの挙動や、燃料電池コージェネレーションシステム全体としての挙動を把握し、安全性を確認する試験方法を提供する。

(2) データ収集方法の検討

① データ収集項目

燃料遮断による燃料供給配管への影響も確認するため、燃料配管の入口圧力も測定することとした。

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.7-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
送・受電電力（受電端及び送電端の各電圧、電流及び電力）、燃料の瞬時流量、燃料導入部圧力、燃料昇圧器出口圧力、改質器温度、セルスタック（温度・電圧・電流）、パッケージ表面温度、排熱回収（貯湯槽往）温度、排熱回収媒体流量、貯湯槽上部温度、周囲大気温度	送・受電電力： 製造業者規定の設計値 以下であること

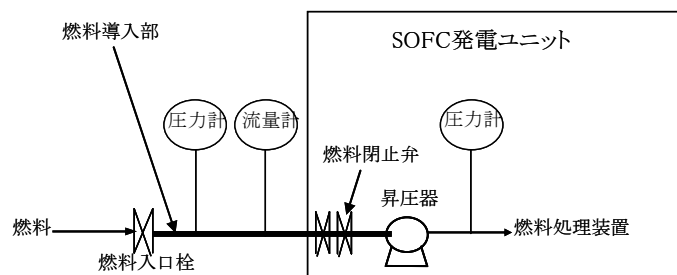
②データ収集方法

- 1) 各種データ収集のための測定機器を所定の位置に接続・設置し、データ収集の準備をする。(図Ⅲ2.2.1.2.1.2.7-1参照)
- 2) 表Ⅲ2.2.1.2.1.2.7-2の運転ケースについて、同じく表Ⅲ2.2.1.2.1.2.7-2のデータ収集方法に従い、表Ⅲ2.2.1.2.1.2.7-1に記載のデータを収集する。なお、データ収集の周期は、燃料遮断操作開始10分前から異常停止後3時間までは、過渡的なデータ変化を的確に捉えるために1秒、その後は15秒とする。
- 3) データ収集後に目視等により外観異常等が無いことを確認する。

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.7-2 運転ケース及びデータ収集方法

運転ケース	運転方法及び測定方法
異常発生ケース(燃料供給停止)	<p>運転方法：定格発電→異常発生(燃料供給停止)操作^{※1}→異常停止</p> <p>測定方法： 定格発電にてパッケージ表面の温度が安定してから1時間経過後、異常発生操作を行う。データは異常発生操作10分前から、異常停止後12時間測定する。 ただし排ガス分析は、異常発生操作10分前から異常発生後3時間までとする。</p>

※1：燃料入口栓を閉止する。



図Ⅲ2.2.1.2.1.2.7-1 燃料供給フローと測定位置

③判定方法

- 1) 燃料ガス供給の停止により、製造業者規定の状態に移行し、確実に燃料の流入が遮断され、燃料電池発電ユニット内部及び表面の温度、排ガスの温度及び成分などが許容範囲内であり、外観異常もなく安全に停止すること。
- 2) 燃料ガス供給の停止後、排熱回収温度に異常な温度上昇が認められないこと。

(3) データ収集の実施

データ収集の結果、燃料遮断後に排ガス温度が約 20℃上昇するが、最高でも 140℃程度であり、基準値である 260℃と比較して十分に低く、その他異常な温度上昇、圧力上昇は見られなかった。なお、停止後に燃料供給配管内が-2kPa 程度の負圧となるが、燃料供給配管に影響を及ぼすほどの圧力変化ではなく、外観異常等も認められなかった。

なお、他の SOFC 供試体についてもデータ収集を行った結果、今回調達した全ての SOFC 供試体について、目的としたデータが取得できており、安全かつ速やかに停止することが

確認された。

(4) 評価方法の検討

今回検討したデータ収集方法により、運転中に燃料が遮断された場合の安全性について、適切に評価を行なうことができた。

2.2.1.2.1.2.8 停電試験

(1) 試験方法検討の目的

停電が起きた場合における燃料電池発電ユニットの挙動や、燃料電池コージェネレーションシステム全体としての挙動を把握し、安全性を確認する試験方法を提供する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

データ収集項目は、表Ⅲ2.2.1.2.1.2.7-1 と同じ。

②データ収集方法

1) 必要に応じ、停電に至る外乱の影響を防ぐ措置を施す。

(例えば排熱回収・貯湯ユニットの沸き上げ停止を防ぐために、貯湯槽から出湯を行う、など)

2) 表Ⅲ2.2.1.2.1.2.8-1 の運転ケースについて、同じく表Ⅲ2.2.1.2.1.2.8-1 の測定方法に従い、表Ⅲ2.2.1.2.1.2.7-1 に記載のデータを収集する。

3) データ収集後に、目視等により外観異常等が無いことを確認する。

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.8-1 運転ケース及びデータ収集方法

運転ケース	運転方法及び測定方法
異常発生ケース(停電)	運転方法：定格発電→異常発生(停電)操作 ^{※1} →3分後に復電操作 測定方法： 定格発電にてパッケージ表面の温度が安定してから1時間経過後、異常発生操作及び復電操作を行う。 データは異常発生操作10分前から、異常発生操作後12時間測定する。 ただし排ガス分析は、異常発生操作10分前から復電操作後3時間までとする。

※1：燃料電池発電ユニット及び排熱回収・貯湯ユニットに接続される送受電回路を同時に開放する。

③判定方法

- 送受電回路の開放により運転を停止する燃料電池発電ユニット及び排熱回収・貯湯ユニットは、製造業者規定の状態に移行し、確実に燃料の流入が遮断され、燃料電池発電ユニット内部及び表面の温度などが許容範囲内であり、外観異常もなく安全に停止すること。また、送受電回路復電後も、製造業者規定の状態に移行し、燃料の流入、燃料電池発電ユニット内部及び表面の温度などが許容範囲内であり、外観異常も起こらないこと。
- 送受電回路を開放しても運転を継続する燃料電池発電ユニットは、製造業者規定の状態

に移行し、燃料電池発電ユニット内部及び表面の温度などが許容範囲内であることを維持しつつ、外観異常もなく、安全かつ確実に運転を継続すること。

3) 停電及び復電後、排熱回収温度に異常な温度上昇が認められないこと。なお、バックアップボイラ付属の排熱回収・貯湯ユニットは、別途 JIS S 2093 に従い、停電時の安全性を確認すること。

(3) データ収集の実施

データ収集の結果、製造業者規定の通り、停電発生後に系統解列状態のもとで運転を継続し、復電後には再起動して再系列することが確認された。さらに、この一連の工程において、異常な温度上昇、圧力上昇は見られなかった。さらに、停電時に停止工程に移行する仕様の SOFC 供試体を含む他の全ての SOFC 供試体についてもデータ収集を行った結果、目的としたデータが取得できており、安全かつ速やかに製造業者規定の工程に移行することが確認された。

(4) 評価方法の検討

今回検討したデータ収集方法により、停電発生時の安全性について、SOFC システムの仕様に係らず、適切に評価を行なえることを確認した。これにより、停電時の安全性を評価する試験方法を確立することができた。

2.2.1.2.1.2.9 制御電源異常時の安全性試験

(1) 目的

制御電源に異常が起きた場合における燃料電池発電ユニットの挙動や、燃料電池コージェネレーションシステム全体としての挙動を把握し、安全性を確認する試験方法を提供する。

(2) データ収集方法の検討

① データ収集項目

データ収集項目は、表Ⅲ2.2.1.2.1.2.7-1と同じ。

② データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.9-1 運転ケース及びデータ収集方法

運転ケース	運転方法及び測定方法
異常発生ケース(制御電源異常)	<p>運転方法：定格発電→異常発生（制御電源異常）操作→異常停止</p> <p>測定方法： 定格発電にてパッケージ表面の温度が安定してから1時間経過後、異常発生操作を行う。データは異常発生操作10分前から、異常停止後12時間測定する。 ただし排ガス分析は、異常発生操作10分前から異常停止後3時間までとする。</p>

③判定方法

- 1) 制御装置電源の遮断により、製造業者規定の状態に移行し、確実に燃料の流入が遮断され、燃料電池発電ユニット内部及び表面の温度などが許容範囲内であり、外観異常もなく安全に停止すること。
- 2) 異常発生操作後、排熱回収温度に異常な温度上昇が認められないこと。

(3) データ収集の実施

データ収集の結果、過渡的な変化を含めて全データ収集項目について目的とするデータが取得できていることを確認した。また、SOFCシステムの制御電源が異常を起こした場合に、異常な温度上昇や圧力上昇は見られず、安全かつ速やかに停止することが確認された。

(4) 評価方法の検討

今回検討したデータ収集方法により、制御電源の異常が発生した場合の安全性について、適切に評価を行なうことができた。

2.2.1.2.1.2.10 システム内部及びパッケージ表面の温度に関する安全性の試験

(1) 目的

SOFC システム内部及び表面の温度に関する挙動を把握し、安全性を確認する試験方法を提供する。

尚、本試験ならびに「2.2.1.2.1.2.11 排ガスの安全性に関する試験」、「2.2.1.2.1.2.12 改質ガス漏洩時の安全性評価試験」については、SOFC システムの規制適正化を検討していた「小規模燃料電池保安技術検討委員会」（事務局：社団法人日本電気協会）にて、SOFC システムに特有の追加検討課題としてとりまとめられたことから試験方法を確立した。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.10-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
燃料の瞬時流量、燃料昇圧器出口圧力、改質器温度、セルスタック（温度・電流・電圧）、オフガス燃焼部温度、パッケージ表面温度、インバータ制御基板周辺温度、プロセス制御基板周辺温度、排気口直後の排ガス温度、周囲大気温度	排気口直後の排ガス温度：260℃以下

②データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.10-2 運転ケース及びデータ収集方法

	運転ケース	運転方法及び測定方法
1	正常運転ケース	表 3.1.2.5-2 と同じ。
2	異常運転ケース(強制高温運転)	
3	異常発生ケース(制御機能喪失)	表 3.1.2.4-2 と同じ。
4	異常発生ケース(燃料ガス停止)	表 3.1.2.7-2 と同じ
5	異常発生ケース(停電)	表 3.1.2.8-2 と同じ
6	異常発生ケース(制御電源異常)	表 3.1.2.9-1 と同じ

③判定方法

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.10-2に示す各運転ケースの測定期間について、表Ⅲ2.2.1.2.1.2.10-1に示す各収集データが、規定の許容範囲内かつ製造業者の設計範囲内であり、外観異常もなく安全に運転または停止すること。

(3) データ収集の実施

データ収集の結果、通常運転時、強制高温運転時ともに、異常な温度上昇は見られなかった。表Ⅲ2.2.1.2.1.2.10-2 記載の他の異常発生ケース（制御機能喪失ケース、燃料遮断ケース、停電ケース、制御電源異常ケース）においても同様に、異常な温度上昇は見られなかった。

(4) 評価方法の検討

今回検討したデータ収集方法により、SOFC システムが異常となった時だけでなく、通常運転時も含めて、システム内部及びパッケージ表面の安全性に関し、適切に評価できることを確認した。

2.2.1.2.1.2.11 排ガスの安全性に関する試験

(1) 試験方法検討の目的

SOFC システムは発電ユニットの排ガスが高温となったり、高濃度の CO を含む排ガスが排出される恐れがあるため、排ガスの温度及び組成に関する挙動を把握し、安全性を確認する試験方法を提供する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.11-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
セルスタック（温度）、パッケージ表面温度、排気口直後の排ガス温度、排気口直後の排ガス濃度（CO 濃度、H ₂ 濃度、THC 濃度、NO _x 濃度、SO _x 濃度、O ₂ 濃度、CO ₂ 濃度）、周囲大気温度	CO 濃度：0.14%以下 ^{※1} (O ₂ =0%換算値)

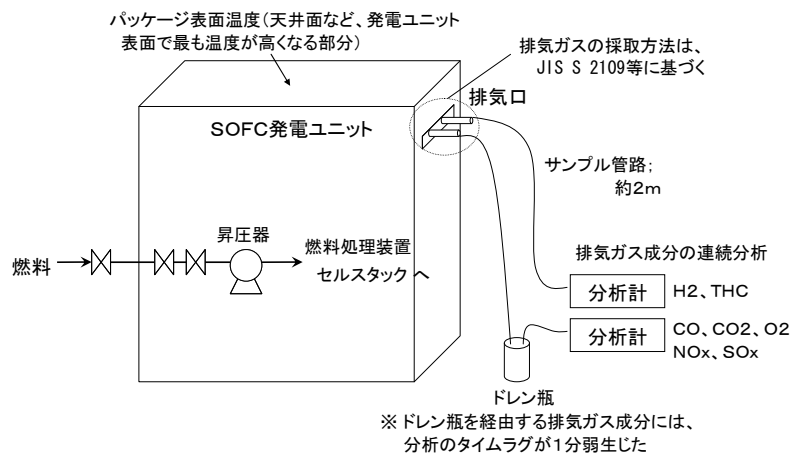
※1：ガス用品の技術上の基準等に関する省令（平成20年1月28日 通商産業省令第5号）の規定による。

②データ収集方法

- 1) 運転ケース及びデータ収集方法は表Ⅲ2.2.1.2.1.2.10-2と同じ。
- 2) 各種データ収集のための測定機器を、所定の位置に接続・設置し、データ収集の準備をする。熱電対は、測定対象の表面に密着させて設置する。（図Ⅲ2.2.1.2.1.2.11-1 参照）
- 3) 必要に応じ、異常運転及び異常停止を実施する際に伴う外乱の影響を防ぐ措置を施す。
（例えば排熱回収・貯湯ユニットの沸き上げ停止を防ぐために、貯湯槽から出湯を行う、

など)

- 4) 表Ⅲ2.2.1.2.1.2.10-2 に示す 6 つの運転ケースにおいて、同じく表Ⅲ2.2.1.2.1.2.10-2 に記載されたデータ収集期間の間、表Ⅲ2.2.1.2.1.2.11-1 に記載の全てのデータを収集する。また、外観異常（異常音、異臭等）の無いことを確認し、結果を記録する。
- 5) 異常発生操作を行う際は、それぞれの操作を実施から 15 分経過しても、製造業者規定の状態が確認できない場合は、製造業者との取り決めによる時間（最大 30 分）経過後に測定を終了する。



図Ⅲ2.2.1.2.1.2.11-1 SOFCシステムのデータ収集

③判定方法

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.10-2 に示す各運転ケースの測定期間について、表Ⅲ2.2.1.2.1.2.11-1 に示す各収集データが、規定の許容範囲内かつ製造業者の設計範囲内であり、外観異常もなく安全に運転または停止すること。

(3) データ収集の実施

データ収集の結果、正常運転時、制御機能喪失時ともに排ガスの温度が異常に上昇したり、排ガス中の微量有害成分の濃度が異常に上昇しないことを確認した。特に CO に関しては、屋内設置の開放燃焼式を除くガス機器の安全基準（2800ppm O₂=0%換算値）を超えることはないことを確認した。表Ⅲ2.2.1.2.1.2.10-2 記載の他の異常発生ケース（制御機能喪失ケース、燃料遮断ケース、停電ケース、制御電源異常ケース）においても同様に、異常な温度上昇や異常な濃度の CO の排出は見られなかった。

(4) 評価方法の検討

排ガス成分の測定に関しては以下の知見が得られた。

JIS 規格では、起動工程、定格運転、停止工程等の各工程の平均値を記録することとあるが、例えば起動工程期間全体で平均値をとると、瞬時最大値の CO 濃度は同じでも、起動時間の長短によって平均値が大きく変動する。

また、JIS 規格に基づく試験方法では、測定した CO 濃度について、同じ排ガス中の O₂

濃度による O₂=0%換算値を算出することとなっている。

この換算方法について、SOFC システムの運転状態(特に起動工程や停止工程)によっては排ガス中の酸素濃度が 21%に近くなることがあり、この時に換算係数が大きくなって見かけの O₂=0%換算値も大きくなる傾向がある。

これらの知見に関しては、後述の排ガス測定試験においてさらに検討を行った。

2.2.1.2.1.2.12 改質ガス漏洩時の安全性評価試験

(1) 試験方法検討の目的

改質ガスが改質器の下流から漏洩した場合における排ガスや換気ガスの組成等を把握し、安全性を確認する試験方法を提供する

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

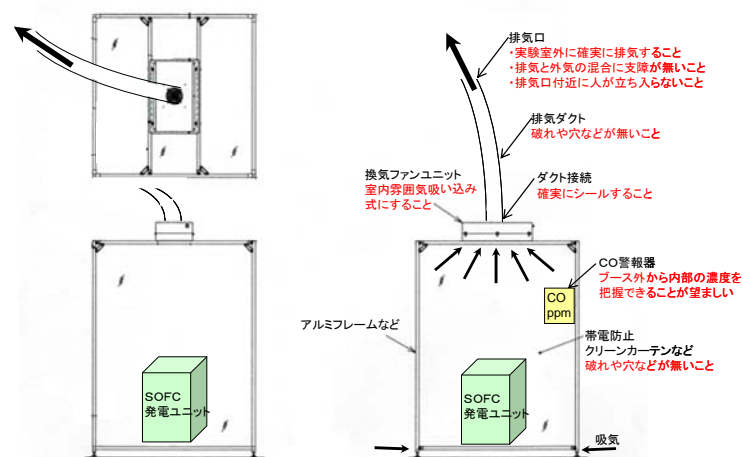
表Ⅲ2.2.1.2.1.2.12-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
セルスタック (温度)、パッケージ表面温度、排気口直後の排ガス温度、排気口直後の排ガス濃度、パッケージ換気ガス濃度 (CO 濃度、NOX 濃度、O ₂ 濃度、CO ₂ 濃度)、周囲大気温度	CO 濃度：0.14%以下 (O ₂ =0%換算値)

②データ収集方法

SOFC 発電モジュール内の改質ガス流路に分岐管を設け、運転中に流量を調整して改質ガスを漏洩させることは極めて困難であるため、カソード空気に改質ガス漏洩量に相当する CO を含む混合気を供給することで、改質ガス漏洩状態を模擬することとした。具体的な手順は以下のとおり。

試験を行なう SOFC 発電ユニットから、CO を含む排気や換気が排出されるリスクに備え、SOFC 発電ユニットを図Ⅲ2.2.1.2.1.2.12-1 に示すようなクリーンブース内に設置する。



図Ⅲ2.2.1.2.1.2.12-1 試験実施時のクリーンブース

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.12-2 運転ケース及び測定方法

運転ケース	運転方法及び測定方法
改質ガス漏洩ケース	<p>運転方法： 定格発電→微量漏洩操作※1→多量漏洩操作※1→大量漏洩操作※1→通常停止</p> <p>測定方法： ・定格発電にてパッケージ表面の温度が安定してから1時間経過後、微量漏洩操作を行い、微量漏洩状態を3時間模擬する。 ・安全な範囲内で運転が継続していることを確認し、微量漏洩操作から3時間後に多量漏洩操作を行い、多量漏洩状態を5分間模擬する。 ・安全な範囲内で運転が継続していることを確認し大量漏洩操作から5分後に大量漏洩操作を行い、大量漏洩状態を5分間模擬する。 ・安全な範囲内で運転が継続していることを確認し、大量漏洩操作から5分後に大量漏洩操作を停止し、システムを停止する。 ・データは微量漏洩操作10分前から、システム停止後3時間測定する。</p>

※1：例えば、カソード空気吸気口に空気及び各漏洩ケースに相当するCOを含むCO/空気混合気のボンベを準備し、各漏洩ケースに応じて漏洩を模擬する混合ガス等を切り替え供給する。

- ・ 起動→定格発電及び大量漏洩操作停止後：空気供給ラインから空気を供給
- ・ 微量漏洩ケース：システム保護装置が作動する漏洩量の1/4相当以下のCO濃度を含むCO/空気混合気を供給
- ・ 多量漏洩ケース：システム保護装置が作動する漏洩量相当のCO濃度を含むCO/空気混合気を供給
- ・ 大量漏洩ケース：システム保護装置が作動する漏洩量相当の2倍以上のCO濃度を含むCO/空気混合気を供給

なお、同様の漏洩状態を模擬できれば、漏洩の具体的手法はこれに限定されない。具体的な模擬漏洩の発生方法と安全対策等については、製造業者に確認すること。

③判定方法

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.12-2に示す各運転ケースの測定期間について、表Ⅲ2.2.1.2.1.2.12-1に示す各収集データが、規定の許容範囲内かつ製造業者の設計範囲内であり、外観異常もなく安全に運転を継続すること。

(3) データ収集の実施

データ収集の結果、過渡的な変化を含めて全データ収集項目について目的とするデータが取得できていることを確認した。また、排ガス、換気ガス中のCO濃度は屋内設置の開放燃焼式を除くガス機器の許容値（2800ppm O₂=0%換算値）を超えることはないことを確認した。

なお、表に示した大量漏洩ケースだけでなく、微量漏洩ケースや多量漏洩ケースについても、排気口や換気口から許容値を上回るCOが排出されることはないことを確認した。

(4) 評価方法の検討

今回検討したデータ収集方法により、改質ガスが漏洩した場合のSOFCシステムの排ガスに関する安全性を適切に評価できることを確認した。

2.2.1.2.1.2.13 過圧防止装置省略時の安全性試験

(1) 試験方法検討の目的

過圧防止装置を省略した際の安全性を評価する試験方法を提供する。

(2) データ収集方法の検討

PEFC システムでの過圧防止装置省略に向けた安全性試験を参考に、SOFC システムの特徴を考慮し、データ収集方法の検討を実施した。

①データ収集項目

- 1) 耐圧部分圧力、送電端出力、セルスタック温度、燃料流量、窒素ガス流量（不活性ガスページ実施の場合）
- 2) 耐圧部分の変形、破損の目視確認、異常音、異常臭の確認

②データ収集方法

1) 通常運転試験

各燃焼部分の温度が所定の点火温度以下になった状態から起動し、出力が定格出力（最大燃料消費量による運転状態）到達後 3 時間運転状態を保持する。その後停止操作を行い、1 時間経過後、かつ、圧力降下を確認できた後にデータ収集を終了する。起動、定格、停止の一連の運転工程の中で最も運転圧力の高い状態を確認する。

2) 制御電源異常試験

- a) 定格出力到達後 30 分以上経過していることを確認し、測定開始 10 分後に制御装置の電源を遮断する。このとき、異常音、異臭等が発生しないか注視し、結果を記録する。
- b) 定格出力時よりも高い運転圧力が確認された場合は、最大圧力の運転状態において制御装置の電源を遮断する。このとき、異常音、異臭等が発生しないか注視し、結果を記録する。
- c) 制御装置の電源を遮断してから 1 時間経過後、かつ、圧力降下を確認できた後にデータ収集を終了する。
- d) 耐圧部分の変形、損傷を確認し、結果を記録する。

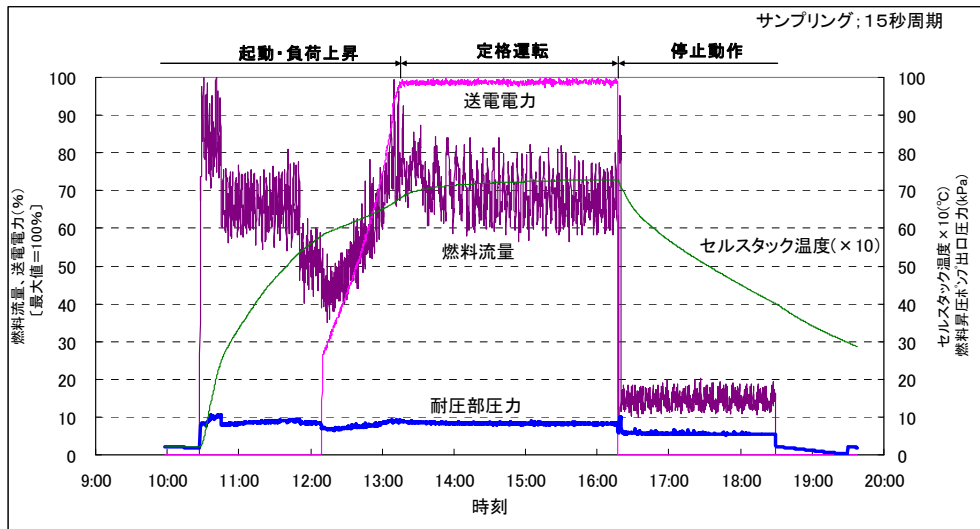
③判定方法

耐圧部分の最大圧力及び試験時の外観異常を確認して記載する。

(3) データ収集の実施

1) 通常運転試験

燃料電池システムの起動から定格運転、停止の一連の運転動作において、可燃性ガスが流通する耐圧部分の圧力等を測定した。運転圧力測定結果を表Ⅲ2.2.1.2.1.2.13-1、供試体①の運転データを図Ⅲ2.2.1.2.1.2.13-1 に示す。可燃性ガスが流通する耐圧部分の圧力が高くなる工程は、供試体①及び供試体②ともに、起動工程時と定格工程時であることを確認した。



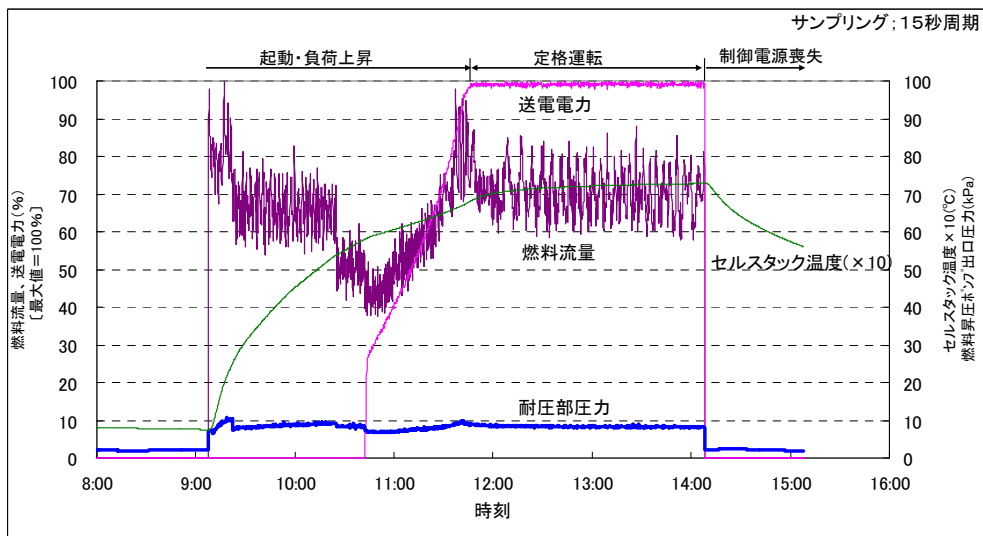
図Ⅲ2.2.1.2.1.2.13-1 起動～停止時の運転データ（供試体②）

表Ⅲ2.2.1.2.1.2.13-1 運転圧力測定結果

メーカー	電気出力 (定格)	最高使用圧力 (kPa)	圧力測定 箇所	運転圧力の最大値 (kPa)		
				起動時	定格運転時	停止時
供試体①	1 kW 級	100 未満	燃料昇圧 ポンプ出口	27	19	20
供試体②	1 kW 級	100 未満	燃料昇圧 ポンプ出口	12	9	10

2) 制御電源異常試験

供試体②（定格運転時）の制御電源異常試験の運転データを図Ⅲ2.2.1.2.1.2.13-2 に示す。制御電源の喪失により正常な運転制御が行われない場合の異常な圧力上昇の有無を確認したが、耐圧部分の異常な圧力上昇や変形や破損は観測されず、安全であることが確認された。



図Ⅲ2.2.1.2.1.2.13-2 起制御電源異常時の運転データ（供試体② 定格時の異常操作）

(4) 評価方法の検討

SOFC システムにおいては、起動状態から定格状態への移行時などの過渡状態において、数秒程度の過渡的な圧力上昇を示す SOFC 供試体もあり、データ収集のサンプリング周期は PEFC システムと同様に「1 秒」とする必要がある。

また、測定終了までの時間について、PEFC システムでは、異常操作後「6 時間」としているが、SOFC システムでは異常操作や停止操作直後に圧力変化が観測されるため、操作後、圧力変化が収束すれば、測定を終了してよいと考える。

2.2.1.2.1.3 性能試験方法の検討

2.2.1.2.1.3.1 試験項目の選定

PEFC システムについては、「定置用固体高分子形燃料電池の標準化に関する調査研究」事業において各種性能試験方法が JIS 規格としてまとめられている（表Ⅲ2.2.1.2.1.3.1-1 参照）。これら性能試験方法について、SOFC システムの構成や運転特性等の相違点を踏まえて平成 19 年度に検討すべき 6 つの試験項目を抽出した。抽出した試験項目を表Ⅲ2.2.1.2.1.3.1-2 に示す。

表Ⅲ2.2.1.2.1.3.1-1 PEFC システムの JIS 規格にて規定される性能試験の項目

基本性能	燃料消費量試験	電気出力試験
	気密性試験	発電効率試験
	点火・燃焼試験	排熱回収効率試験
	起動試験	負荷変動特性試験
	停止試験	負荷追従特性試験
環境性	騒音試験	排水測定試験
	排ガス測定試験	
耐環境性	耐風試験	温湿度サイクル試験
	耐雨試験	

表Ⅲ2.2.1.2.1.3.1-2 抽出した試験項目

基本性能	点火・燃焼試験	負荷追従特性試験
	負荷変動特性試験	
環境性	排ガス測定試験	
耐環境性	耐風試験	耐雨試験

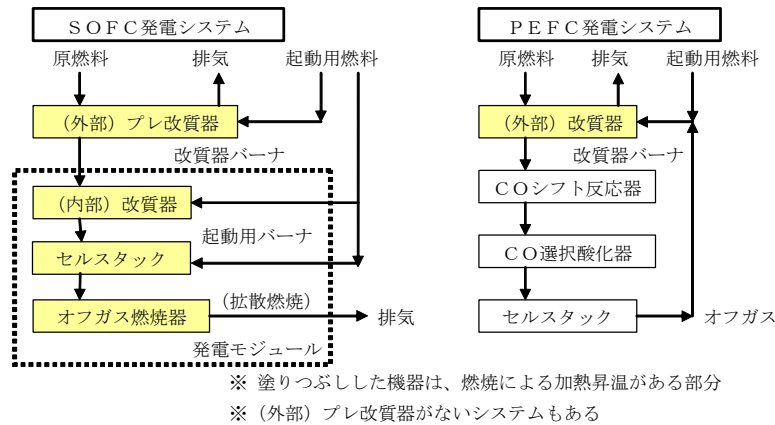
2.2.1.2.1.3.2 点火・燃焼試験

(1) 目的

SOFC システムは、燃焼過程において以下（図Ⅲ2.2.1.2.1.3.2-1 参照）のように PEFC システムと相違する点があるので、この特徴を踏まえて起動昇温時から発電運転時を経て停止降温時までの燃焼状態を確認する必要がある。

また、SOFC システムのセルスタック部材は熱衝撃に弱いセラミックであるため、PEFC システムのように停止降温時に原燃料の供給を直ぐに断ってしまうのではなく、微量の燃料を流し燃焼加熱を継続しながらセルスタック部を時間をかけてゆっくりと降温させることが多い。（ある程度の温度レベルまで降温したら、その後は燃料供給を断ち自然降温させ

る。)



図Ⅲ2.2.1.2.1.3.2-1 SOFC システムと PEFC システムの相違

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.1.3.2-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
改質器温度、セルスタック (温度)、オフガス燃焼部温度、改質器バーナ燃焼火炎 ^{※1} 、セルスタック部バーナ燃焼火炎 ^{※1} 、オフガス燃焼部燃焼火炎 ^{※1} 原燃料流量、排気口直後の排ガス温度、排ガスの成分ガス濃度、周囲大気温度	改質器バーナ燃焼火炎など： 火炎を検知すること。 火炎検知設備を設備しないシステムにあっては、セルスタックなどの温度上昇及び排ガス成分の濃度変化により点火・燃焼を確認すること

※1：火炎検知器（フレームセンサーなど）が設置されてなく、温度測定による燃焼管理を行っている場合には、測定除外としてもよい。

②データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.1.3.2-2 運転ケース及びデータ収集方法

運転ケース	運転方法及びデータ収集方法
1 正常運転ケース	<p>運転方法： 冷起動→定格発電→最低負荷運転→通常停止操作→通常停止 なお、点火試験の回数は3回以上とし、1回目の点火は冷起動後、着火を確認して停止する。2回目以降は、引き続きこの試験を行う。</p> <p>データ収集方法： 起動操作10分前から測定を開始し、先ず起動昇温時の点火確認を行う。点火確認試験の後に、起動昇温を継続して発電状態にする。 定格出力発電を1時間継続した後、最低出力までの出力変動を行い、最低出力発電を1時間継続させる。その後、通常停止操作を行って、セルスタック（セルバンドル）温度が100℃以下になるまで測定する。</p>

③試験の方法

1) 点火試験

製造業者の示す点火の方法によって繰り返し点火操作を行い、点火の回数及び爆発的に点火しないことを確認する。第1回目の点火については、停止状態において起動を行い、着火を確認し、運転を停止する。第2回目以降は、引き続きこの試験を実施する。点火試験の回数は3回以上とする。点火の確認は、燃焼検知手段、製造業者の示す方法などによる。(フレームセンサー等火炎を直接検知するもの以外でも、燃焼開始による炉内温度上昇を熱電対で確認するものも製造業者が温度上昇プロファイルの標準データベースを持っており、それと比較することで点火を判断することによりよい。改質器を部分燃焼で温度上昇させる場合も同様とする。)

2) 燃焼試験

- a) 着火の確認：各燃焼部分の温度が所定の点火温度以下になった状態から起動し、この試験を実施する。起動開始からオフガス切替完了後炉内（改質器バーナ炉内、又はオフガス燃焼器炉内）温度が安定する状態までにおいて、炉内（すべてのバーナを対象とする。バーナのない拡散燃焼の場合も含む。）に設置した燃焼検知手段などによって燃焼状態を確認する。
- b) 燃焼及び運転状態の確認：オフガス切替完了後炉内（改質器バーナ炉内、又はオフガス燃焼器炉内）温度が安定した状態から定格出力到達後30分以上経過後以上経過後、最低出力まで出力変動を行い、炉内に設置した燃焼検知手段などによって燃焼状態を確認する。
- c) 停止時の確認：発電状態から停止操作を行い、降温過程での燃料供給停止ステップの後に炉内（改質器バーナ炉内、又はオフガス燃焼器炉内）に設置した燃焼検知手段など、確実に消火することを確認する。
- d) 理論乾燥燃焼ガス中のCO濃度(体積%)：気体燃料の場合、試験ガスの条件をJIS S 2093表2又は表3に示す1-1又はB-1とし、起動から停止までの状態で、機器の燃焼ガス排出部全面にわたって可能な限り、平均に燃焼ガスを採取する。乾燥燃焼ガス中のCO濃度及びO₂又はCO₂濃度を測定し、式(7)及び式(8)によって算出した値を15分間単純移動平均処理し、その最大値を理論乾燥燃焼ガス中のCO濃度とする。なお、試験に際しては、必要に応じて燃焼空燃比などの調整を行ってもよいこととする。

$$CO = CO_a \times \frac{O_{2t}}{O_{2t} \times O_{2a}} \dots\dots\dots(7)$$

又は

$$CO = CO_a \times \frac{CO_{2max}}{CO_{2a} - CO_{2t}} \dots\dots\dots(8)$$

ここに、 CO： 理論乾燥燃焼ガス中CO濃度(体積%)
CO_a： 乾燥燃焼ガス中のCO濃度測定値(体積%)
O_{2t}： 給気口雰囲気中(乾燥状態)のO₂濃度測定値(体積%)
(新鮮空気の場合は、O_{2t} = 21 %)

O_{2a} : 乾燥燃焼ガス中の O_2 濃度測定値(体積%)

ただし、発電運転中の安定状態を除いては、 O_2 濃度が 20%を超える場合には 20%とする。

※ 大気汚染防止法施行規則 別表第 2 を準用

CO_{2max} : 理論乾燥燃焼ガス中の CO_2 濃度(体積%)

CO_{2a} : 乾燥燃焼ガス中の CO_2 濃度測定値(体積%)

CO_{2t} : 給気口雰囲気中(乾燥状態)の CO_2 濃度測定値(体積%)

e) 逆火の確認:a)の状態において、炉内(すべてのバーナを対象とする。)に設置した燃焼検知手段などによって、炎がバーナ内部で燃焼しているような状態にならないこと及び逆火による消火がないことを確認する。

(3) 評価方法の検討

SOFC システムでは火炎検知器を有しないシステムも存在する。そのため、火炎検知器を有しないシステムにあっては、対象とする温度測定部が確実に点火・燃焼状態を確認できるものとなっているかについて、製造業者が明示することを条件に、点火・燃焼部の温度上昇によっても燃焼状態の確認を行なえる内容とした。

さらに、起動・昇温工程に長時間かかる機種も存在するが、安全確認という趣旨からは、時間がかかっても点火試験を 3 回行うべきである。そこで、2 回目以降の点火試験においては、冷機状態と同等とみなせる「各燃焼部分の温度が所定の点火温度以下になった状態」から起動させるとすることで、試験趣旨を損なわず所要時間を短縮できる規定とした。

一方、燃焼試験に関して、SOFC システムではセルスタック手前に CO 除去器がないため、起動時だけでなく、オフガス燃焼に切り替わった後もオフガス燃焼が確実に安定して行われているかを確認する必要がある。そのため、CO 濃度は起動から停止までの全工程で測定するように規定した。

PEFC システムでは、CO 濃度を測定する燃焼ガスの採取時点を「バーナ点火後 15 分又はオフガス切替前までのいずれか早いほうの時間まで」などと規定されているのに対し、SOFC システムでは、「起動から停止までの状態で」と規定されており、運転中は常時排ガスを採取することとなっているものの、CO 濃度の算出は、全工程において測定したどのような値とするかが明確ではなかった。そこで、式(7)及び式(8)によって算出した値を 15 分間単純移動平均処理し、その最大値を理論乾燥燃焼ガス中の CO 濃度として評価することとした。

2.2.1.2.1.3.3 排ガス測定試験

(1) 目的

PEFC システムと異なりセルスタック手前に CO シフト反応器及び CO 選択酸化器がないため、排ガス性状を確認する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.1.3.2-1 のデータ収集項目（「改質器バーナ燃焼火炎」を除く）に準じて測定する。

②データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.1.3.3-2 運転ケース及びデータ収集方法

	運転ケース	運転方法及びデータ収集方法
1	正常運転ケース	運転方法： 冷起動→定格発電→部分負荷運転→通常停止操作→通常停止 データ収集方法： 起動操作 10 分前から測定を開始する。起動昇温を経て発電状態にする。 定格出力運転、75%出力運転、50%出力運転、最低出力運転の 4 ステップの順に、各々目標負荷の運転状態到達の 30 分後から 1 時間測定を継続する。 その後、通常停止操作を行って、セルスタック（セルバンドル）温度が 100℃以下になるまで測定する。

③試験の方法

- 1) JIS C 8824 7. 排ガス測定試験の7.3試験の方法に基づき、試験を実施する。
- 2) 排ガス中の各成分濃度については、測定した O₂ 濃度を用いて換算するが、発電運転中の安定状態を除いては、O₂ 濃度が 20%を超える場合には 20%とする。
※ 大気汚染防止法施行規則 別表第 2 を準用

(3) データ収集の実施

得られたデータをもとに、作成した試験方法案に対する加筆修正及び改善案等の検討や、点火・燃焼試験における CO 濃度算出方法の検討を行った。

(4) 評価方法の検討

点火・燃焼試験と同様に、システム内部の点火・燃焼部の状態を適切に把握できるようにして、起動から停止までの全工程で排ガス測定を行う内容とした。

一方、起動工程や停止工程等では、システムによって排ガス中の O₂ 濃度が 20%前後となり、O₂=0%換算値が極端に大きくなり、換算値の精度が落ちる。そこで、大気汚染防止法施工規則の別表第 2 における NO_x 濃度換算の規定等を参考に、O₂=0%換算を行なう際に、排ガス中の O₂ 濃度が 20%以上である場合は O₂ 濃度を 20%と固定して換算を行なうよう規定した。

2.2.1.2.1.3.4 耐風試験

(1) 目的

排気口、給排気筒から風が吹き込んだ場合でも、正常に点火・起動でき、また燃焼状態を維持し発電を継続できるかどうかを確認する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.1.3.2-1 のデータ収集項目に準じて測定する。

②データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.1.3.4-2の耐風試験項目に従って、データを収集する。

表Ⅲ2.2.1.2.1.3.4-2 耐風試験項目

	測定細目
(1) 点火試験	点火回数(回)、爆発的点火回数(回)
(2) 燃焼試験	システムの状態(起動～定格発電)、燃焼状態、警報、異常停止、緊急停止の有無

③試験の方法

1) 点火試験

屋外設置式のものにあつては、図Ⅲ2.2.1.2.1.3.4-1に示す2方向のそれぞれについて、5m/sの風を送り、「点火・燃焼試験」に記載された点火試験方法のとおり試験を実施する。

2) 燃焼試験

a) 着火の確認：屋外設置式のものにあつては、図Ⅲ2.2.1.2.1.3.4-1に示す2方向について、5m/sの風を送った状態で、「点火・燃焼試験」に記載された燃焼試験方法のとおり着火の確認を行う。

b) 燃焼及び運転状態の確認：機器をa)の定格出力到達後、30分以上経過した段階で、屋外設置式のものにあつては、図Ⅲ2.2.1.2.1.3.4-1に示す2方向のそれぞれについて、2.5m/sの風を3分間及び15m/sの風を1分間送り、それぞれの状態において、「点火・燃焼試験」に記載された燃焼試験方法のとおり燃焼及び運転状態の確認を行う。

c) 起動/運転状態の確認

a) 及びb)の全試験中において、警報又は異常停止・緊急停止が発生しないことを確認する。

(3) データ収集の実施

①点火試験

屋外設置式タイプでは点火直後に燃焼部の温度が急激に上昇しており、点火が確実に行われていることを確認した。また、排気温度の上昇で間接的に燃焼が起こっていることも確認した。

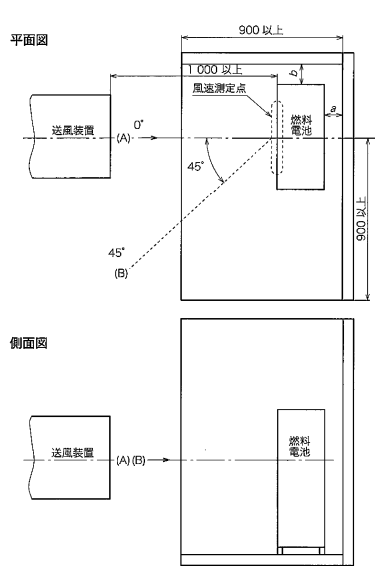
一方密閉式タイプはあらかじめ電気ヒータでスタックを800℃以上に昇温し、ガスを投入することで点火させる仕組みであった。システムの仕組み上連続点火試験ができなかったため、一旦点火時の温度以下(概ね800℃以下)に下げた後、2回目の点火試験を実施し、3回目の点火試験も同様に行った。正常着火したことを、排ガス中のO₂濃度の減少や、CO、CO₂、SO_x濃度の増加で間接的に確認した。

②燃焼試験

屋外設置式及び密閉式の両タイプの供試体も定格発電中に所定の風速の風を当てても消火及び逆火がなく安定した燃焼状態であることを確認した。

(4) 評価方法の検討

点火・燃焼試験方法の検討で得られた知見を反映させ、点火・燃焼試験方法に記載された方法のとおり実施・確認する規定とした。



単位 mm

注記1 a及びbは、取扱説明書などによる最小指定寸法。

注記2 風は、送風装置と機器の給気部及び排気部との距離を1000mm以上隔離し、給気部及び排気部に一様に当てるものとする。ただし、送風装置の吹出し口と機器の給気部及び排気部との関係から、同時に当てられない場合は、排気部に当てるものとする。

注記3 風の測定前の校正は、機器及び障害物がない状態において、送風装置の吹出し口の前方1000 mm以上の実際の位置で、送風装置側から見て、給気部及び排気部に外接する長方形の中心点を中央風速とし、長方形の各頂点を含む5点を測定する。ただし、開口部の下端が地面から200mm未満のときは、地面

図Ⅲ2.2.1.2.1.3.4-1 屋外耐風試験装置

2.2.1.2.1.3.5 耐雨試験

(1) 目的

屋外降雨条件下に設置されても、正常に点火・起動でき、また燃焼状態を維持して発電を継続できるかどうか、また発電終了後に絶縁耐力が低下していないかを確認する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.1.3.5-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
改質器温度、セルスタック (温度)、オフガス燃焼部温度、改質器バーナ燃焼火炎 ^{※1} 、セルスタック部バーナ燃焼火炎 ^{※1} 、オフガス燃焼部燃焼火炎 ^{※1}	漏洩電流: 5mA 以下
原燃料流量、排気口直後の排ガス温度、排ガスの成分ガス濃度、漏洩電流、周囲大気温度	

②データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.1.3.5-2 耐雨試験項目

	測定細目
(1) 点火試験	点火回数(回)、爆発的点火回数(回)
(2) 燃焼試験	システムの状態(起動～定格発電)、燃焼状態、警報、異常停止、緊急停止の有無
(3) 絶縁耐力試験	定格出力(送電端)(kW)、漏洩電流値(mA)

③試験の方法

1) 点火試験

図Ⅲ2.2.1.2.1.3.5-1に示す方法で各方向5分間散水した後に、「点火・燃焼試験」に記載された点火試験方法のとおり試験を実施する。

2) 燃焼試験

a) 着火の確認

図Ⅲ2.2.1.2.1.3.5-1の試験装置に示す方法で各方向5分間散水した後に、「点火・燃焼試験」に記載された燃焼試験方法のとおり、燃焼部の点火から定格出力まで安定した燃焼状態であることを確認する。

b) 燃焼及び運転状態の確認

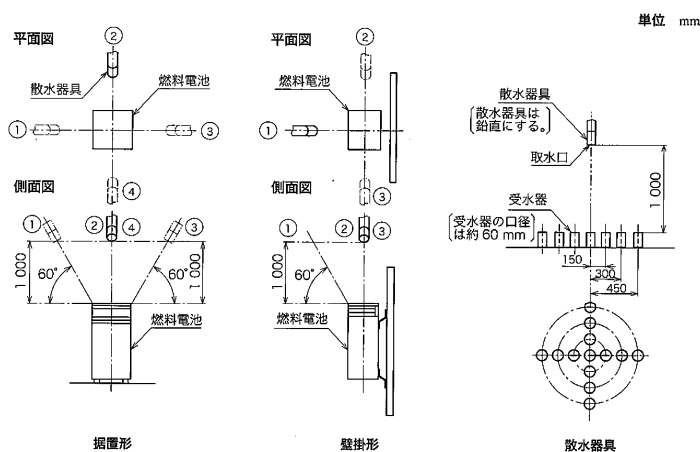
a)の定格出力到達後30分以上経過した段階で、機器の正面に散水しながら、「点火・燃焼試験」に記載された燃焼試験方法のとおり、消火しないことを確認する。

c) 起動/運転状態の確認

a) 及びb)の全試験中において、警報、異常又は緊急停止が発生しないことを確認する。

3) 絶縁耐力試験方法

JIS C8823 20.2「絶縁耐力試験」の方法に準じる。



注記1 散水器具は、上図右側に示す方法で降水量を測定したとき、全受水器の平均が $3 \pm 0.5 \text{ mm/min}$ で、各全受水器の降水量の平均値に対する偏差が $\pm 30\%$ のものとする。

注記2 貯湯槽を試験する場合も、同様に設置する。

図Ⅲ2.2.1.2.1.3.5-1 屋外設置式の耐雨試験装置

(3) データ収集の実施

①点火試験

耐風試験と同様に、屋外設置式タイプでは点火直後に燃焼部の温度が急激に上昇しており、点火が確実に行われていることを確認した。また、排気温度の上昇で間接的に燃焼が起こっていることも確認した。

一方密閉式タイプは、正常着火したことを、排ガス中の O_2 濃度の減少や、 CO 、 CO_2 、 SO_x 濃度の増加で間接的に確認した。

②燃焼試験

定格出力到達後 30 分以上経過した段階で、屋外設置式タイプはシステム本体に、密閉式タイプは排気筒先端に 10 分間散水しても消火しないことを、屋外設置式タイプでは各部温度の低下が起こらなかったことで、密閉式タイプでは排ガス濃度に変化がないことで確認した。

③絶縁耐力試験

絶縁耐力試験の結果、漏れ電流の値は十分小さく、絶縁抵抗は規定の $1M\Omega$ 以上を満たしており、耐雨試験終了後絶縁破壊はみられなかった。

(4) 評価方法の検討

耐雨試験時における点火時の機器の状態や、点火・燃焼状態の確認方法については、点火・燃焼試験方法の検討で得られた知見を反映させた。

2.2.1.2.1.3.6 負荷変動特性試験

(1) 目的

SOFC システムにおける能動的な負荷変化特性を評価するため負荷変化速度を測定する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.1.3.6-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
発電ユニット送電/受電（電力・電流）、模擬負荷電力、送電周波数、受電周波数、セルスタック（温度・電流・電圧）、パッケージ表面温度（天井面、背面、側面、前面及び床面）、周囲木壁温度（天井面、背面、側面、前面及び床面）、周囲大気温度	セルスタック温度：製造業者規定の設計値以下

②試験の方法

- 固体酸化物形燃料電池発電ユニットが定格発電中で、かつセルスタック部の温度安定していることを確認する。
- 負荷変動値を設定し、負荷下降または上昇動作の開始時刻と出力電力を記録する。
- 固体酸化物形燃料電池発電ユニット出力電力(P_{net})を見て、負荷下降または上昇動作の

完了時刻と出力電力を記録する。

d) 負荷下降または上昇動作の開始時刻と完了時刻の差から負荷下降または上昇所要時間 (T_{1cdwn} 、 T_{1cup}) を算出し、また開始時刻と完了時刻の出力電力の差から負荷変動幅 (P_d) を算出する。

e) 負荷変化速度の計算 負荷変化速度(下降時: V_d)及び負荷変化速度(上昇時: V_u)は、式(1)及び式(2)によって計算する。

$$V_d = P_d / T_{1cdwn} \dots\dots\dots (1)$$

$$V_u = P_d / T_{1cup} \dots\dots\dots (2)$$

負荷変動幅 (P_d) 負荷下降所要時間 (T_{1cdwn}) 負荷上昇所要時間 (T_{1cup})

(3) データ収集の実施

負荷到達条件を、負荷設定値の 10%以内と定格値の 2%以内として収集データを比較した。また、同一機で安定時間を変えた際の負荷変動速度を測定し、作成した試験方法案に対する加筆修正及び改善案等の検討を行った。

(4) 評価方法の検討

負荷到達条件については、設定値の 10%以内と定格値の 2%以内とでは、各社とも傾向は類似していたが、設定値の 10%以内は、最低負荷が小さいシステムほど、基準が厳しくなり、高性能のために不利となる問題が生じる。そのため、負荷到達条件は定格値の 2%以内とした。

さらに、SOFC システムは、同一機でも安定時間により負荷変動速度が変わることを確認した。そのため、セルスタック部の温度が安定する条件として、国際標準の熱平衡条件を追加した。

2.2.1.2.1.3.7 負荷追従特性試験

(1) 目的

この試験は、発電ユニットの負荷追従性を指標するための試験である。負荷追従とは、電力需要の変化とともに、システムの出力電力が自動的に変化することをいう。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.1.3.7-1 データ収集項目

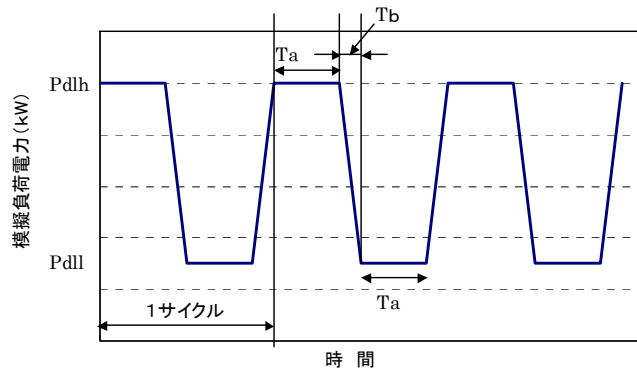
主な測定項目	許容値など
発電ユニット送電/受電 (電力・電流)、模擬負荷電力、送電周波数、受電周波数、セルスタック (温度・電流・電圧)、改質器温度、セルスタック (温度)、オフガス燃焼部温度、排気口直後の排ガス温度、都市ガス流量、排ガスの成分濃度 (CO、THC、NOx、SOx、O2、CO2)、周囲大気温度	CO 濃度 : 0.14%以下 (O2=0%換算値)

②データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.1.3.7-2 の負荷パターン条件に従って、表Ⅲ2.2.1.2.1.3.7-1 に記載のデータを収集する。(図Ⅲ2.2.1.2.1.3.7-1 負荷変動パターン参照)

表Ⅲ2.2.1.2.1.3.7-2 負荷パターン条件

試験条件番号	Ta(min)	Tb(min)	最高負荷	最低負荷	試験条件番号	Ta(min)	Tb(min)	最高負荷	最低負荷
1	0	1	定格の120%	定格の50%	21	0	1	定格の120%	最低出力
2	0	5			22	0	5		
3	0	10			23	0	10		
4	0	20			24	0	20		
5	0	30			25	0	30		
6	1	1			26	1	1		
7	1	5			27	1	5		
8	1	10			28	1	10		
9	1	20			29	1	20		
10	1	30			30	1	30		
11	5	1			31	5	1		
12	5	5			32	5	5		
13	5	10			33	5	10		
14	5	20			34	5	20		
15	5	30			35	5	30		
16	10	1			36	10	1		
17	10	5			37	10	5		
18	10	10			38	10	10		
19	10	20			39	10	20		
20	10	30			40	10	30		



T_a : P_{d1h} 及び P_{d1l} の保持時間、 T_b : P_{d1h} から P_{d1l} への負荷変動時間

図Ⅲ2.2.1.2.1.3.7-1 負荷変動パターン

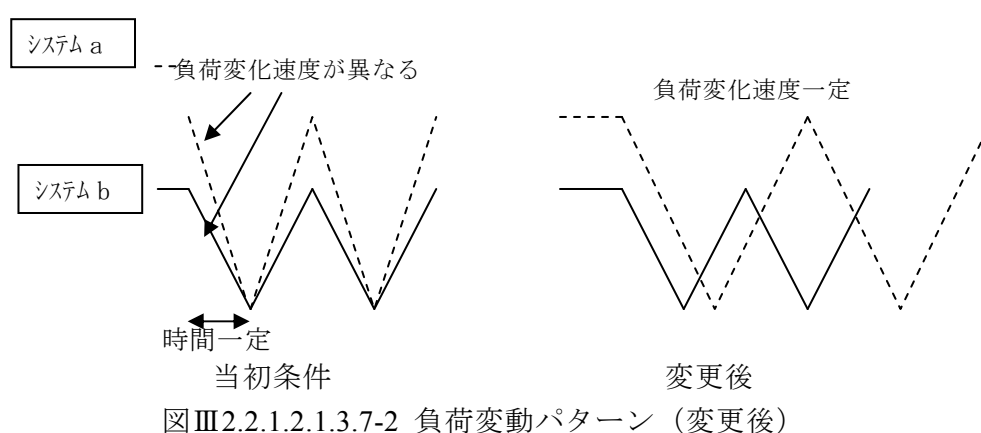
(3) データ収集の実施

収集データを解析し、負荷変動パターンの妥当性や負荷追従性の指標の1つである「電力寄与率」の算出方法について検討を行った。

(4) 評価方法の検討

当初案による負荷パターン（表Ⅲ2.2.1.2.1.3.7-2）の場合、出力範囲が大きいシステムほど、負荷変化速度が大きくなる事を意味するため、負荷追従条件が厳しくなる。システムにかかわらず同一の負荷変化速度で評価できるように、時間ではなく、負荷変化速度を条件として定めるように変更した。

さらに、データ分析からは、負荷変化速度の大きい負荷パターン条件になるほど、システム間で負荷追従性能に差異が生じやすいという結果が得られた。その結果を踏まえ、当初案に比べ、評価試験装置で実行可能な範囲で負荷変化速度の大きい条件を追加し、負荷変化速度の小さい条件を減少させた負荷パターンに変更した。変更後の負荷パターンを図Ⅲ2.2.1.2.1.3.7-2 に示す。



試験負荷がシステム出力の 100%を超えている期間のデータを計算に含めると、負荷追従性の指標の 1 つである「電力寄与率」が低下することになるため、計算に含めないように変更した。さらに、もう 1 つの負荷追従性能の指標である「電力過剰率」についても、常にマイナス値になる計算式となっていたが、電力過剰率（%）をマイナス値とする表現は奇異と考えられるため、計算式を変更した。

2.2.1.2.1.4 成果の活用

(1) 安全性評価試験方法の検討

発電出力やセル形状、改質方式などが異なる多様な SOFC 供試体を調達し、SOFC システムの安全性に関するデータ収集を実施して、平成 18 年度末までに「小規模燃料電池保安技術検討委員会」（事務局：社団法人日本電気協会）や規制当局からの要請項目（2.2.1.6 章「規制当局等の指摘に基づく燃料電池の安全性に関する検証・確認データの収集」参照）も含めた安全性評価試験に関する検討を完了した。

また、試験方法の検討に際して、SOFC システムのシステム構成や運転特性、各種安全対策や安全装置作動時のシステム挙動など、多様な仕様の SOFC システムについて安全性に係る知見を得た。

これらの成果を公的委員会や規制当局に提供し、規制再点検の議論に活用された。

この結果、以下の通り SOFC システムの市場導入や普及に係る電気事業法及び消防法上

の各種規制適正化に貢献した。

①常時監視の不要化（電気事業法関連）

SOFCシステムの安全性に関する調査・机上検討、SOFC 供試体の設置検討などを行なって得られた知見を、規制適正化を審議する「技術基準適合評価委員会」（事務局：社団法人日本電気協会）に提出した。この結果、一定の要件を満たす SOFC システムについては、発電出力に係らず常時監視義務を不要化（随時巡回化）できるとの結論が得られ、平成 18 年 12 月 14 日に条文改正（電気設備の技術基準の解釈 第 51 条）されて即日施行されている。

②不活性ガス置換義務の省略（電気事業法関連）

平成 17 年度から平成 18 年度にかけて調査・机上検討を行なって得られた知見と、実機試験を通じて得られた安全性データや知見（2.2.1.2.1.2.2「不活性ガス置換省略時の安全性試験」参照）を、規制適正化を審議する「小規模燃料電池保安技術検討委員会」（事務局：社団法人日本電気協会）に提出した。この結果、平成 19 年 3 月 5 日に「10kW 未満で一定の要件を満たす SOFC システムにおいては、不活性ガスパージを省略した場合でも法令等が要求する安全性が確保される」との結論が得られ、平成 19 年 9 月 3 日に条文改正された。

③小出力発電設備化（電気事業法関連）

不活性ガス置換省略と同様に、平成 17 年度から平成 18 年度にかけて調査・机上検討を行なって得られた知見と実機試験を通じて得られた安全性データや知見（例えば 2.2.1.2.1.2.4「制御機能喪失時の安全性試験」、2.2.1.2.1.2.11「排ガスの安全性に関する試験」、2.2.1.2.1.2.12「改質ガス漏洩時の安全性試験」など）を、規制適正化を審議する「小規模燃料電池保安技術検討委員会」に提出した結果、平成 19 年 3 月 5 日に「PEFC システムについて現行規定されている一般用電気工作物化の技術基準を適用することにより、屋内設置の開放燃焼式を除く SOFC システムについても安全性を確保できる」との結論が得られ、平成 19 年 9 月 3 日に条文改正された。

④設置保有距離の省略、設置届出義務の不要化、逆火防止装置の省略(消防法関連)

平成 17 年度から平成 18 年度にかけて調査・机上検討を行なって得られた知見と、実機試験を通じて得られた安全性データや知見（例えば 2.2.1.2.1.2.3「設置離隔距離試験」、2.2.1.2.1.2.5「高温部における安全性試験」など）を、規制適正化を審議する「固体酸化物型燃料電池発電設備等の安全対策の確保に係る調査検討会」（事務局：消防庁）に提出した。この結果、平成 19 年 2 月 21 日に「燃料改質型の小規模(10kW 未満) SOFC システムについて、PEFC システムの技術基準に適合した安全対策を遵守するとともに高温部を適切に断熱することによって、同等の安全性が確保されることを確認した」との結論が得られ、平成 22 年 3 月 30 日に条文改正された。

⑤過圧防止装置省略時の安全性試験(電気事業法関連)

SOFC システムの過圧防止装置省略に係わる技術的安全要件については、学識経験者、

燃料電池製造事業者、燃料供給事業者等からなる「燃料電池システム技術基準検討部会」を JGA に設置して平成 22 年 1 月～平成 22 年 3 月にかけて検討を行った。

検討部会での議論を踏まえ、過圧防止装置省略した際の安全要件として以下のようにまとめられた。

「今回要望の過圧防止装置をもたない小規模の SOFC システムは、燃料ガスを通ずる部分が大気に開放された構造であること、さらに現状の技術基準に規定されている安全要件に加えて、PEFC システムと同様に燃料ガスを通ずる部分に接続するポンプの吐出圧力制限を設けることにより、安全を確保できる。」

過圧防止装置の設置に関する技術基準は、電気事業法の発電用火力設備に関する技術基準を定める省令第 32 条等に規定されているが、検討部会での上記結論を踏まえて、技術基準省令等の改正案についても併せて検討を行い、「燃料電池発電設備に関する技術基準省令改正の要望書」としてとりまとめた。

この要望書は本事業の終了後に日本電気技術規格委員会機構に提出し、その委員会の中で行政当局への技術基準省令の改正要請に向けた審議、評価が行われる予定である。

(2) 性能試験方法の検討

各種性能試験については、現行の PEFC システムの JIS 規格をベースに、国際標準との整合化も見据えて SOFC システムの性能試験方法標準化に資する検討を行ない、実機試験検証を通じて国内外標準の変更に資する知見や実機データを蓄積した。そして、PEFC-JIS 規格をベースに作成した SOFC システムの試験方法案の妥当性検証や加筆変更を進め、これまでの検討内容を反映した SOFC システムの試験方法変更案を作成した。表 III 2.2.1.2.1.4-1 に SOFC システム試験方法変更案に関する検討結果の一例を示す。

点火・燃焼試験の点火確認においては、繰り返し点火による確認時間を短縮するため、点火・燃焼部の温度を PEFC-JIS 規格で規定する冷機状態での起動に対し、冷機状態と同等の条件を前提としてメーカー指定の所定の点火温度に変更した。また、PEFC システムとは異なり、燃料改質後の CO 除去を必要としないといった SOFC システムの特徴を踏まえ、オフガス中の CO を考慮した試験方法とするため、CO 濃度測定を PEFC-JIS 規格で規定する起動時のみに対し、起動から停止までの全工程とし、CO 濃度測定値は 15 分間単純移動平均で算出することに変更した。

表 III 2.2.1.2.1.4-1 SOFC システム試験方法変更案の検討結果の一例
(PEFC-JIS 規格ベースからの変更)

試験	PEFC-JIS 規格ベースの SOFC 試験方法案の内容	SOFC 試験方法変更案の内容	変更のポイント
点火・燃焼試験	メーカー指定の状態（冷機状態）より起動	各燃焼部分の温度が所定の点火温度（メーカー指定）以下になった状態から起動。	繰り返し点火時間の短縮
	定格到達 30 分以上経過後に測定	定格出力到達後の安定時間を検討した結果、定格到達 30 分以上経過後に測定（変更なし）	定格到達 30 分以上経過で、燃焼状態が安定することを確認済み

	炉内（全てのバーナを対象とする）に設置した燃焼検知手段で確認	炉内（全てのバーナを対象とする。バーナのない拡散燃焼の場合も含む。）に設置した燃焼検知手段で確認。	多様な燃焼方法への対応
	停止操作を行い、消火を確認	停止操作後、燃料供給が停止するまで監視。	より確実な停止の確認
	「バーナ点火後 15 分又はオフガス切替前までのいずれか早い方の時間まで」で採取	・起動から停止までの状態で採取 ・15 分間の単純移動平均で濃度を算出	濃度の算出方法
排ガス測定試験	O ₂ 濃度実測値で 0% 換算	O ₂ 濃度が 20% 以上の場合は、O ₂ 濃度を 20% として換算	0% 換算値の精度向上
負荷変動特性試験	定格到達 1 時間経過後に測定	定格発電中かつセルスタック温度が安定後に測定（安定条件は IEC に準拠）	温度安定までの非定常状態に対する安定条件の追加
	定格→50%出力→定格→最低出力→50%出力の順で測定	最低出力→定格での測定を追加。	試験条件による負荷変化速度の違いに対応
	設定値の±10%以内	定格出力の±2%以内	国際標準改訂内容を検証
負荷追従試験	1 秒	1 秒以下	負荷変化速度が速いことへの対応
	サンプリング周期を 1 秒として計算	サンプリング周期を加味した計算式に変更	
耐風・耐雨試験	メーカー指定の状態（冷機状態）より起動	各燃焼部分の温度が所定の点火温度（メーカー指定）以下になった状態から起動	「点火・燃焼試験」の修正を反映

さらに、作成した SOFC システム試験方法変更案の内容と国際標準の内容を比較検討し、国際標準との整合化案を取りまとめた。これら SOFC システム性能試験方法の検討成果については、2.2.1.5 章に記載の定置用燃料電池の国際標準（IEC）改訂検討の場へ提供した。

表Ⅲ2.2.1.2.1.4-2 に、国内 WG3 へ提案した整合化案の一例を示す。国内 WG 審議の結果、点火・燃焼試験に関するバーナ部分の点火確認手段の追加や、SOFC システムに限定した冷機起動条件の定義変更等が承認され、これらの内容は、国際標準改定の審議を行う国際 WG の場において、日本からの提案として審議される予定である。

一方、作成した性能試験方法から得られた各知見を、「家庭用燃料電池の技術上の基準および検査の方法」第 5 版や、SOFC システムに係わる JIS 規格原案作成の場へ提供し、国内標準にも活用された。

表Ⅲ2.2.1.2.1.4-2 国際標準（IEC）との整合化案の一例（国内 WG3 への提案内容）

提案項目	国際標準（IEC）の規定内容	整合化案	整合化のポイント
点火・燃焼試験	バーナ等の点火確認手段を火炎検出器に限定	点火確認手段として、火炎検出器以外に、「その他の適切な手段」を追加	多様な燃焼方法への対応（起動用バーナ、部分酸化燃焼、オフガス燃焼、排ガス触媒燃焼等）
	バーナ試験にて、冷機起動と暖機起動の両方の試験を規定	SOFC の場合は、各燃焼部の温度が所定の点火温度以下（メーカー指定の温度）であれば冷機起動とみなす。	繰り返し点火時間の短縮
	バーナ点火確認のみの	起動から定格発電、停止ま	安定した燃焼の確認と、起

	規定。また、CO 測定は通常安定状態で実施	での工程での燃焼性の確認と CO 測定を追加。CO 測定値は 15 分単純移動平均処理した値で算出。	動や停止の過渡的な状態を含めた全工程での CO 測定を追加
耐風試験	54 km/h の試験風速での点火確認のみ規定	風条件下において、定格出力での安定状態にて消火しないことを追加。	風条件下において、起動時の点火確認だけでなく、定格発電での安定した燃焼の確認を追加

2.2.1.2.2 純水素駆動型燃料電池に係わる基準・標準化検討

2.2.1.2.2.1 供試体の調達

定置用で小形（発電出力 10kW 未満、最高使用圧力 0.1MPa 未満）の純水素 PEFC システムについて、国内及び海外のメーカーの開発状況を調査した結果を踏まえて、データを収集する純水素 PEFC 供試体を選定した。選定した純水素 PEFC 供試体の外観を図 III 2.2.1.2.2.1-1 に示す。

なお、上記純水素 PEFC 供試体はいずれもコージェネレーション仕様のものである。上記の純水素 PEFC 供試体は JIA 東京事業所に設置した。



荏原バラード

東芝燃料電池システム

図 III 2.2.1.2.2.1-1 純水素 PEFC 供試体の外観

2.2.1.2.2.2 安全性評価試験の検討

2.2.1.2.2.2.1 試験項目の選定

通常運転時において火災や火傷等の危険がないかどうか、また燃料電池の内部や外部で異常が発生したときに、安全に停止動作等に移行できるかどうか、という観点から、以下に示す 6 項目の試験を抽出した。これらについて、実機データ収集結果を踏まえた試験手法の見直しなどをおこない、安全性評価試験方法として作成した。

- 設置離隔距離検討のための試験
- 高温部における安全性試験
- 停電試験
- 制御機能喪失時の安全性試験
- 燃料遮断試験
- 制御電源異常時の安全性試験

以下、上記各試験項目について、それぞれ具体的に記述する。

2.2.1.2.2.2.2 設置離隔距離試験

(1) 目的

燃料電池パッケージからの輻射熱により燃料電池パッケージ周辺の建物壁など、可燃物の温度が異常に上昇しないことを確認する試験方法を提供する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.2.2.2-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
操作時に手を触れる部分（起動・停止スイッチなど）、ガス閉止弁表面温度、排気口直後の排ガス温度、パッケージ表面温度（天井面、背面、側面、前面及び床面）、周囲木壁温度（天井面、背面、側面、前面及び床面）、周囲大気温度	操作時に手を触れる部分（起動・停止スイッチなど）： 60℃以下 70℃以下

②データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.2.2.2-2 運転ケース及びデータ収集方法

	運転ケース	運転方法及び測定方法
1	正常運転ケース	運転方法：冷起動→定格発電→通常停止操作→通常停止 測定方法： 起動操作 10 分前から測定を開始し、定格出力にてセルスタックの温度が安定してから 3 時間維持し、その後、通常停止操作から各温度が低下するのを確認できるまで測定する。
2	異常運転ケース （強制高温運転）	運転方法：定格発電→異常運転（強制高温運転）操作→異常停止 測定方法： 定格出力にてセルスタックの温度が安定してから 30 分経過後に異常運転操作を行う。データは異常運転操作 10 分前から、異常停止後各温度が低下するのを確認できるまで測定する。

③判定方法

改質型 PEFC システムと同様に、「表Ⅲ2.2.1.2.2.2.2-1 などに示す各収集データが、規定の許容範囲内かつ製造業者の設計範囲内であり、外観異常もなく安全に運転及び停止すること」、とした。

(3) データ収集の実施

通常運転ケースと異常運転ケースそれぞれについて、今回調達した全ての純水素 PEFC 供試体について、目的としたデータが取得できた。なお、周囲木壁の温度は表Ⅲ2.2.1.2.2.2.2-1 などに示す許容値の範囲内であった。

(4) 評価方法の検討

異常操作開始を「未燃ガス処理器温度及びセルスタック温度が安定して 30 分」としていたが、未燃ガス処理器温度は、定格運転時においても安定性が悪くシステム安定性の判断

の指標とはならないことが分かったため、異常操作開始を「セルスタック温度が安定して30分」とすることとした。

また、今回のデータからも排ガスの成分、温度に異常は見られず、改質型 PEFC システムと同様に、設置離隔距離試験時の排ガスの測定は不要とすることとした。

2.2.1.2.2.3 制御機能喪失時の安全性試験

(1) 目的

システムが制御機能を失った場合における燃料電池の挙動や、燃料電池コージェネレーションシステム全体としての挙動を把握し、安全性を確認する試験方法を提供する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.2.3-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
受電端及び送電端（各電圧・電流・電力）、未燃ガス処理器温度、燃料の瞬時流量、燃料昇圧器出口圧力、セルスタック（温度）、ウォッチドッグタイマ出力、貯湯槽出湯温度、出湯温水流量、貯湯槽（上部・中部・下部）温度、周囲大気温度	未燃ガス処理器温度：製造業者規定の設計値以下であること

②データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.2.3-2 運転ケース及びデータ収集方法

運転ケース	運転方法及び測定方法
異常発生ケース(制御機能喪失)	<p>運転方法：定格発電→異常発生(制御機能喪失)操作→異常停止</p> <p>測定方法： 定格発電にて、セルスタック温度が安定^{※1}し、30分以上経過してから異常発生操作^{※1}を行う。データは異常発生操作10分前から、各温度が低下するのを確認できるまで測定する。</p>

※1：「温度が安定」とは、測定位置における温度上昇が、30分間あたり0.5℃以下になった状態とする。

③判定方法

収集データが規定の許容範囲内、かつ製造業者の設計範囲内であり、外観異常もなく安全に停止すること。貯湯槽は、出湯温度に異常な温度上昇がないこと。

(3) データ収集の実施

データ収集結果から、過渡的な変化を含めて全データ収集項目について目的とするデータが取得できていることが確認できた。また、制御機能喪失とともに速やかに停止動作に移行し、外観異常もなく安全に停止した。その他、データ蓄積用に収集した機器内部のパラメータ推移（未燃ガス処理器温度、セルスタック電圧等）に異常な上昇等がみられないことや、排ガス組成についても通常停止時の結果と同様であった。なお、他の純水素 PEFC

供試体についてもデータ収集を行った結果、今回調達した全ての純水素 PEFC 供試体について、目的としたデータが取得できており、安全かつ速やかに停止した。

(4) 評価方法の検討

制御機能喪失の方法として、今回はウォッチドッグタイマの出力を停止する手法を検討したが、制御機能の喪失方法としては、例えばマイコン自体に本試験用の特別なプログラムを搭載するなど、他の手法も考えられるため、ウォッチドッグタイマの出力停止に限定しないこととした。

2.2.1.2.2.4 高温部における安全性試験

(1) 目的

パッケージ内の温度が異常に上昇しないこと及び、インバーター等の電気部品が耐熱温度以上にならないことを確認することで、安全性を検証する試験方法を提供する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.2.4-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
送電端瞬時電力、セルスタック表面温度、未燃ガス処理器表面温度、インバーター制御基板周辺温度、インバータースイッチング素子近傍、周囲大気温度	セルスタック表面温度、未燃ガス処理器表面温度： 製造業者規定の耐熱温度以下であること (例えば 80℃)

②データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.2.4-2 運転ケース及びデータ収集方法

	運転ケース	運転方法及び測定方法
1	正常運転ケース	運転方法：冷起動→定格発電→通常停止操作→通常停止 測定方法： 起動操作10分前から測定を開始し、定格出力にてセルスタックの温度が安定してから3時間維持し、その後、通常停止操作から各温度が低下するのを確認できるまで測定する。
2	異常運転ケース (強制高温運転)	運転方法：定格発電→異常運転(強制高温運転)操作→異常停止 測定方法： 定格出力にてセルスタックの温度が安定してから30分経過後に異常運転操作を行う。データは異常運転操作10分前から、異常停止後各温度が低下するのを確認できるまで測定する。

③判定方法

表Ⅲ2.2.1.2.2.4-2 に示す各運転ケースの測定期間について、表Ⅲ2.2.1.2.2.4-1 などに示す各収集データが、規定の許容範囲内かつ製造業者の設計範囲内であり、外観異常もなく安全に運転及び停止すること。

(3) データ収集の実施

データ収集結果、強制高温運転ケースでは、強制高温運転開始後に各部の温度が上昇を開始し、約5分で異常を検知して停止していることや、過渡的な変化を含めて全データ収集項目について目的とするデータが取得できていることが確認できた。

また、正常運転では起動から定格運転を経て停止に問題なく移行すること、異常運転では停止動作に移行し、外観異常もなく安全に停止した。その他、インバーター等電気部品の各部温度のパラメータ推移について、強制高温運転時に未燃ガス処理器断熱材表面温度が約5℃上昇し、プロセス制御基盤周辺温度も約7℃上昇しているが、いずれの許容値の範囲内であり、異常な温度上昇等がみられなかった。

(4) 評価方法の検討

機器内部の異常の確認は 2.2.1.2.2.2.3 制御機能喪失時の安全性試験と同様とした。

2.2.1.2.2.2.5 燃料遮断試験

(1) 目的

燃料の供給に異常が起きた場合における燃料電池発電ユニットの挙動や、燃料電池コージェネレーションシステム全体としての挙動を把握し、安全性を確認する試験方法を提供する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

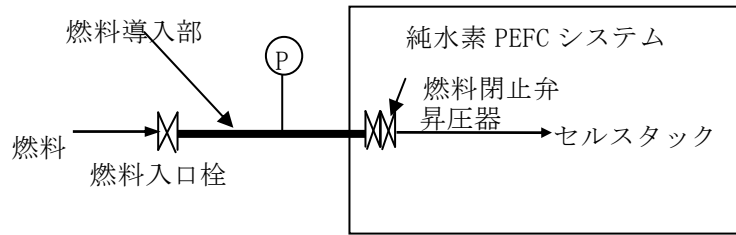
表Ⅲ2.2.1.2.2.2.5-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
送・受電電力（受電端及び送電端の各電圧、電流及び電力）、燃料の瞬時流量、燃料導入部圧力、燃料昇圧器出口圧力、改質器温度、セルスタック（温度・電圧・電流）、未燃ガス処理器温度、パッケージ表面温度、排熱回収（貯湯槽往）温度、排熱回収媒体流量、貯湯槽上部温度、周囲大気温度	未燃ガス処理器温度：製造業者規定の設計値以下であること

②データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.2.2.5-2 運転ケース及びデータ収集方法

運転ケース	運転方法及び測定方法
異常発生ケース（燃料供給停止）	<p>運転方法：定格発電→異常発生（燃料供給停止）操作→異常停止</p> <p>測定方法： 定格発電にて、セルスタック温度が安定して30分以上経過してから異常発生操作を行う。データは異常発生操作10分前から、異常停止後15分測定する。</p>



図Ⅲ2.2.1.2.2.2.5-1 燃料導入部フロー図

③判定方法

製造業者規定の状態に移行し、外観異常もなく、安全に停止すること。また、燃料導入部に変形や破損がないこと。貯湯槽は、出湯温度に異常な温度上昇がないこと。

(3) データ収集の実施

燃料入口栓閉止とともに送電電力が速やかにゼロになり（停止動作に移行）、外観異常もなく安全に停止した。また、燃料導入部に変形等は確認されていない。その他、データ蓄積用に収集した機器内部のパラメータ推移（未燃ガス処理器温度、セルスタック温度等）に異常な温度上昇等がみられないことや、排ガス組成についても通常停止時の結果と同様であった。

(4) 評価方法の検討

機器内部の異常の確認は 2.2.1.2.2.2.3 制御機能喪失時の安全性試験と同様とした。

2.2.1.2.2.2.6 停電試験

(1) 目的

停電が起きた場合における燃料電池発電ユニットの挙動や、燃料電池コージェネレーションシステム全体としての挙動を把握し、安全性を確認する試験方法を提供する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

データ収集項目は 2.2.1.2.2.2.5 燃料遮断試験と同じ。

②データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.2.2.6-1 運転ケース及びデータ収集方法

運転ケース	運転方法及び測定方法
異常発生ケース(停電)	運転方法：定格発電→異常発生（停電）操作→3分後復電 測定方法： 定格発電にて、セルスタック温度が安定して30分以上経過してから送受電回路（貯湯槽を含む）を同時に開放する。送受電回路を開放してから3分経過時点で復電（貯湯槽を含む）する。データは送受電回路開放の10分前から、復電後15分測定する。

③判定方法

- 1) 送受電回路開放により停止するシステムは、製造業者規定の状態に移行し、確実に燃料の流入が遮断され、外観異常もなく、安全に停止すること。また、送受電回路復電後も製造業者規定の状態に移行し、燃料の流入及び外観異常が発生しないこと。
- 2) 送受電回路開放により、運転を継続するシステムは、製造業者規定の状態に移行し、外観異常や異常停止が発生しないこと。また、送受電回路復電後も製造業者規定の状態に移行し、外観異常や異常停止が発生しないこと。
- 3) 貯湯槽は、出湯温度に異常な温度上昇がないこと。なお、バックアップボイラ付属の貯湯槽は別途、JIS S 2093 に従い、停電時の安全性を確認すること。

(3) データ収集の実施

データ収集結果、過渡的な変化を含めて全データ収集項目について目的とするデータが取得できていることが確認できた。また、停電とともに発電電力が速やかにゼロになるなど、外観異常もなく安全に系統解列した。その他、データ蓄積用に収集した機器内部のパラメータ推移（未燃ガス処理器温度、セルスタック温度等）に異常な温度上昇等がみられないことや、排ガス組成についても通常停止時の結果と同様であった。

(4) 評価方法の検討

今回の試験においては、純水素 PEFC システム本体と同時に貯湯槽も停電操作を実施したが、実際の停電時にも同様となるものと思われることから、貯湯槽も停電処理することを明記することとした。

2.2.1.2.2.7 制御電源異常時の安全性試験

(1) 目的

制御電源に異常が起きた場合における燃料電池発電ユニットの挙動や、燃料電池コージェネレーションシステム全体としての挙動を把握し、安全性を確認する試験方法を提供する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

データ収集項目は 2.2.1.2.2.2.5 燃料遮断試験と同じ。

②データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.2.2.7-1 運転ケース及びデータ収集方法

運転ケース	運転方法及び測定方法
異常発生ケース（制御電源異常）	運転方法：定格発電→異常発生（制御電源異常）操作→異常停止 測定方法： 定格発電にて、セルスタック温度が安定し、30分以上経過してから異常発生操作を行う。データは異常発生操作10分前から、各温度が低下するのを確認できるまで測定する。

③ 判定方法

- 1) 制御装置電源の遮断により、製造業者規定の状態に移行し、確実に燃料の流入が遮断され、純水素 PEFC 発電ユニット内部及び表面の温度、排ガスの温度及び成分などが許容範囲内であり、外観異常もなく安全に停止すること。
- 2) 排熱回収・貯湯ユニットは、出湯温度に異常な温度上昇がないこと。

(3) データ収集の実施

データ収集結果、過渡的な変化を含めて全データ収集項目について目的とするデータが取得できていることが確認できた。また、本純水素 PEFC 供試体は送電電力が速やかにゼロになるなど制御電源異常とともに速やかに停止動作に移行し、外観異常もなく安全に停止した。その他、データ蓄積用に収集した機器内部のパラメータ推移（未燃ガス処理器温度、セルスタック温度等）に異常な温度上昇等がみられないことや、排ガス組成についても通常停止時の結果と同様であった。

(4) 評価方法の検討

機器内部の異常の確認は 2.2.1.2.2.2.3 制御機能喪失時の安全性試験と同様とした。

2.2.1.2.2.3 性能試験方法の検討

2.2.1.2.2.3.1

試験項目の選定改質型 PEFC システムに関する基本性能試験、環境性試験、耐環境性能試験方法については、「定置用固体高分子形燃料電池の標準化に関する調査研究」事業において、各種性能試験方法が JIS 規格としてまとめられている。これら性能試験方法について、純水素 PEFC システムの特徴を踏まえ、追記、修正等が必要と思われる試験項目として以下の 6 試験項目を抽出し、性能評価試験方法の素案作成をおこなった。

- 点火・燃焼試験
- 耐雨試験
- 気密性試験
- 耐風試験
- 負荷変動・負荷追従性能試験
- 排ガス測定試験

2.2.1.2.2.3.2 点火・燃焼試験

(1) 目的

純水素 PEFC システムは、燃料改質用の燃焼部を搭載しない点において燃料改質型のシステムと異なるが、オフガスを処理するための燃焼部は搭載している。そのため、点火試験・燃焼試験とも、燃料改質型のシステムと基本的な考え方は同様となる。また、燃料が純水素であること、発電部での水素利用率が高くできること等の特徴がある。これらの特徴を踏まえて、起動昇温時から発電運転時を経て停止降温時までのオフガス燃焼部の燃焼状態を確認する必要がある。

(2) データ収集方法の検討

① データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.2.3.2-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
送電端電力、オフガス燃焼部温度、オフガス燃焼部燃焼火炎 ^{※1} 、原燃料流量、電源電圧、排気口直後の排ガス温度、排ガスの成分ガス濃度（H2 濃度）、周囲大気温度	排ガスの成分ガス濃度（H2 濃度）： 1%以下 オフガス燃焼部燃焼火炎 ^{※1} ： 火炎を検知すること

※1：火炎検知器（フレイムセンサーなど）がなく、温度測定による燃焼管理を行っている場合は、測定除外としてもよいものとする。

② データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.2.3.2-2 運転方法及びデータ収集方法

項目	内容
運転方法	冷起動→定格発電→最低出力→通常停止操作→通常停止
データ収集方法	起動操作時から測定を開始し、先ず起動昇温時の点火確認を行う。点火確認試験の後に、起動昇温を継続して発電状態にする。 定格出力発電を 30 分継続した後、最低出力までの出力変動を行い、最低出力発電を 30 分継続させる。その後、通常停止操作を行って、燃焼プロセス（水素供給弁が閉じ、燃焼室のアフターパージを行う）が終了してから 60 分経過するまで測定する。

③ 試験の方法

1) 点火試験

JIS C 8823「小形固体高分子形燃料電池システムの安全性及び性能試験方法」の 8.1c)の方法に準じる。

2) 燃焼試験

a) 着火の確認 停止状態から起動を行う。起動開始から水素供給弁が開き、炉内温度が一定の温度^{※1}以上となる状態までにおいて、炉内^{※2}に設置した燃焼検知手段などによって燃焼状態を確認する。

※1：「一定の温度」とは、製造業者が着火判定に用いる燃焼部の炉内温度とする。

※2：「炉内」とは、オフガス処理器（触媒燃焼の場合も含む。）など燃焼部がある部分の全てを対象とする。

b) 燃焼及び運転状態の確認：発電システムが定格出力到達後 30 分以上経過後、最低出力まで出力変動を行い、炉内に設置した燃焼検知手段などによって燃焼状態を確認する。

c) 停止時の確認：発電状態から停止操作を行い、炉内に設置した燃焼検知手段など、確実に消火することを確認する。

d) 逆火の確認：a)の状態において、炉内(すべてのバーナを対象とする。)に設置した燃焼

検知手段などによって、炎がバーナ内部で燃焼しているような状態にならないこと及び逆火による消火がないことを確認する。ただし、燃焼部が触媒燃焼によるもののみの場合には、本確認は不要とする。

(3) 評価方法の検討

点火、燃焼を、オフガス燃焼部での触媒燃焼の有無として評価することが、純水素 PEFC のシステム構成上適切であると判断した。検討の結果、オフガス燃焼部温度を評価項目とすることで、点火、燃焼状態を把握できることがわかった。また、燃焼状態把握の観点から、排ガス中の水素濃度についても評価項目に加えることが適切である。

また、触媒燃焼では原理的に逆火が生じないことから、オフガス燃焼が触媒燃焼のみの場合には逆火の確認は不要であると判断した。

2.2.1.2.2.3.3 排ガス測定試験

(1) 目的

純水素 PEFC システムの排ガス成分を測定し、安全性を確認する。

(2) データ収集方法の検討

① データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.2.3.2-1 のデータ収集項目（「オフガス燃焼部燃焼火炎」を除く）に準じて測定する。

② データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.2.3.3-1 運転方法及びデータ収集方法

項目	内容
運転方法	冷起動→定格発電→部分負荷発電→通常停止操作→通常停止
データ収集方法	起動操作10分前から測定を開始し、定格発電にて目標負荷到達の30分後から3時間測定する。その後、75%出力、50%出力、最低出力について、それぞれ目標負荷到達の30分後から3時間の測定をおこなったうえで、通常停止操作を行う。停止操作後、60分経過した時点で測定を終了する。

③ 試験の方法

JIS C 8824「小形固体高分子形燃料電池システムの環境試験方法」の7.3の方法に準じる。但し、各工程における各測定成分の平均値を記録するとともに、水素濃度については1分移動平均値の最大値も併記する。

(4) 評価方法の検討

水素濃度については、一定の空間に高濃度での水素ガスが滞留することが危険性の要因となる。従って、瞬時値のみで評価するのではなく、時間の要素を考慮した基準値が適切

と考える。ただし、システムによって起動時間などが異なることを踏まえ、各工程での平均値とするよりは、一定時間の平均値という考え方の方がより実用に適していると考えた。具体的には、1 分間(当該時間の前後 30 秒)平均値という考え方にてまとめることとした。これは、ガス漏れ警報器の漏洩検知手法にならったもので、ガス漏れ警報器では、基準値を超えてから 1 分以内に発報する規定になっていることを参考としたものである。

2.2.1.2.2.3.4 耐風試験

(1) 目的

強風の環境下においても良好な点火、燃焼が行われることを確認する必要がある。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.2.3.2-1 のデータ収集項目に準じて測定する。

②データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.2.3.4-1 運転ケース及びデータ収集方法

	運転ケース	運転方法及びデータ収集方法
1	正常運転ケース	<p>運転方法： 冷起動→定格発電→最低負荷運転→通常停止操作→通常停止</p> <p>データ収集方法： 機器を耐風試験に準ずる試験装置に設置し、耐風試験環境とする。 起動操作時から測定を開始し、先ず起動昇温時の点火確認を行う。点火確認試験の後に、起動昇温を継続して発電状態にする。 定格出力発電を 30 分継続した後、最低出力までの出力変動を行い、最低出力発電を 30 分継続させる。その後、通常停止操作を行って、燃焼プロセス（水素供給弁が閉じ、燃焼室のアフターパージを行う）が終了するまで測定する。</p>

③試験の方法

1) 点火試験

屋外設置式のものにあつては、図Ⅲ2.2.1.2.1.3.4-1 に示す 2 方向のそれぞれについて、5m/s の風を送り、2.2.1.2.2.3.2 「点火・燃焼試験」に記載された点火試験方法のとおり試験を実施する。

2) 燃焼試験

a) 着火の確認：屋外設置式のものにあつては、図Ⅲ2.2.1.2.1.3.4-1 に示す 2 方向のそれぞれについて、5m/s の風を送った状態で、2.2.1.2.2.3.2 「点火・燃焼試験」に記載された燃焼試験方法のとおり着火の確認を行う。

b) 燃焼及び運転状態の確認：機器を a) の定格出力到達後、30 分以上経過した段階で、屋外設置式のものにあつては、図Ⅲ2.2.1.2.1.3.4-1 に示す 2 方向のそれぞれについて、2.5 m/s の風を 3 分間及び 15 m/s の風を 1 分間送り、それぞれの状態において、炉内に設置した

燃焼検知手段などによって、消火及び逆火がなく安定した燃焼状態であることを確認する。

c) 起動/運転状態の確認 a) 及び b) の全試験中において、警報又は異常停止・緊急停止が発生しないことを確認する。

(3) データ収集の実施

改質型の PEFC システムと同様の風速、風向にて耐風環境下に置いた場合でも、供試体 A、B ともに、点火・燃焼試験時と同様のデータ傾向が見られることを確認した。

(4) 評価方法の検討

点火・燃焼試験方法の検討と同様、オフガス燃焼部での点火、燃焼の評価方法を準用することで、耐風試験においても適切な評価が可能と考える。

2.2.1.2.2.3.5 耐雨試験

(1) 目的

大雨の環境下においても良好な点火、燃焼が行われることを確認する必要がある。また、雨の侵入や湿度の影響により、機器の絶縁が低下していないか確認する必要がある。

(2) データ収集方法の検討

① データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.2.3.2-1 のデータ収集項目に加え、漏洩電流を測定する。

② データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.2.3.5-1 運転ケース及びデータ収集方法

	運転ケース	運転方法及びデータ収集方法
1	正常運転ケース	<p>運転方法： 冷起動→定格発電→最低負荷運転→通常停止操作→通常停止</p> <p>データ収集方法： 機器を耐雨試験に準ずる試験装置に設置し、耐雨試験環境とする。起動操作時から測定を開始し、先ず起動昇温時の点火確認を行う。点火確認試験の後に、起動昇温を継続して発電状態にする。 定格出力発電を 30 分継続した後、最低出力までの出力変動を行い、最低出力発電を 30 分継続させる。その後、通常停止操作を行って、燃焼プロセス（水素供給弁が閉じ、燃焼室のアフターパージを行う）が終了するまで測定する。</p>

③ 試験の方法

1) 点火試験

屋外設置式のものにあつては図Ⅲ2.2.1.2.1.3.5-1（屋外設置式の耐雨試験装置）の試験装置に示す方法で各方向 5 分間散水した後に、2.2.1.2.2.3.2「点火・燃焼試験」に記載された

点火試験方法のとおり試験を実施する。

2) 燃焼試験

- a) 着火の確認: 屋外設置式のものにあつては図Ⅲ2.2.1.2.1.3.5-1 の試験装置に示す方法で各方向 5 分間散水した後に、2.2.1.2.2.3.2「点火・燃焼試験」に記載された燃焼試験方法のとおり着火の確認を行う。
- b) 燃焼及び運転状態の確認: a) の定格出力到達後 30 分以上経過した段階で、機器の正面に散水しながら、炉内に設置した燃焼検知手段などによって、消火しないことを確認する。
- c) 起動/運転状態の確認 a) 及び b) の全試験中において、警報、異常又は緊急停止が発生しないことを確認する。

3) 絶縁耐力試験

2.2.1.2.1.3.5「耐雨試験」に記載された試験方法のとおり試験を実施する。

(3) データ収集の実施

改質型 PEFC システムと同様の降雨条件にて耐雨環境下に置いた場合でも、供試体 A、B ともに、点火・燃焼試験時と同様のデータ傾向が見られることを確認した。

(4) 評価方法の検討

点火・燃焼試験方法の検討と同様、オフガス燃焼部での点火、燃焼の評価方法を準用することで、耐雨試験においても適切な評価が可能である。

一方、降雨試験後の漏洩電流計測についても、改質型 PEFC システムと同様の手法、手順にて適切に計測できることを確認した。

2.2.1.2.2.3.6 負荷変動・負荷追従性能試験

(1) 目的

この試験は、純水素 PEFC 発電ユニットの負荷変動性及び負荷追従性を指標するための試験である。

(2) データ収集方法の検討

① データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.2.3.6-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
受電端電力、送電端電力及び模擬負荷電力、原燃料流量、排ガスの成分ガス濃度 (H ₂ 濃度、O ₂ 濃度)、周囲大気温度	排ガスの成分ガス濃度 (H ₂ 濃度): 1%以下

② データ収集方法

- 1) 負荷変動パターンが事前にプログラミングされている自動負荷変動式模擬負荷を準備し、所定の位置に接続・設置する。
- 2) 電力計を電力送電端の純水素 PEFC 発電ユニット直近に接続し、送電電力を測定する。
また、電力計を電力受電端の純水素 PEFC 発電ユニット直近に接続し、受電電力を測定

する。

表Ⅲ2.2.1.2.2.3.6-2 試験項目及びデータ収集方法

	試験項目	運転方法及びデータ収集方法
1	負荷変動特性試験	運転方法： 定格発電→50%出力→定格発電→最低出力 →50%出力→最低出力→定格発電 ----- データ収集方法： 各出力状態において、30分以上経過してから次の出力状態への変更動作を行う。変更動作開始時刻及び変更動作完了時刻*1 を記録する。
2	負荷追従特性試験	運転方法： 定格発電→負荷変動パターンでの負荷追従運転（5サイクル） ----- データ収集方法： 定格発電にて、30分以上経過してから自動負荷変動式模擬負荷のプログラミング運転*2を開始する。自動負荷変動式模擬負荷のプログラミング運転が終了するまで、燃料電池ユニットの運転を継続させる。

※1：負荷上昇動作の場合、燃料電池発電ユニット出力電力が設定値の90%以上に達した時刻とする。負荷下降動作の場合、燃料電池発電ユニット出力電力が設定値の110%以下に達した時刻とする。

※2：定格出力の1.2倍の負荷電力と、50%出力もしくは最低負荷の負荷電力とを一定時間毎に交互に繰り返す。

③試験の方法

1)負荷変動特性試験

2.2.1.2.1.3.6 負荷変動試験の方法に準じる。

2)負荷追従特性試験

JIS C 8823「小形固体高分子形燃料電池システムの安全性及び性能試験方法」の17d)の方法に準じる。但し、サンプリング周期1秒以下で測定する。

(3) データ収集の実施

負荷変動特性試験のデータ収集結果より、負荷上昇時及び負荷低下時のいずれにおいても、定格～最低負荷間の変動が30秒程度以内でおこなわれており、一般の改質型PEFCシステムより負荷変動速度が速い傾向にあることが確認された。

(4) 評価方法の検討

各出力状態での保持時間について、改質型PEFCシステムのJIS規格で規定されている「設定出力到達後60分経過後」と、他の試験でも一般に用いられている「設定出力到達後30分経過後」との2ケースを比較検討したところ、実機試験結果において、その後の負荷変動速度において両者に違いが見られないことを確認した。

セルスタック温度や触媒燃焼器温度、排ガス温度なども併せて計測したが、負荷変動速度は設定出力の管理のみに影響されることが確認できている。従って本事業では、各出力

での保持時間を「設定出力到達後 30 分経過後」とした。

2.2.1.2.2.3.7 気密性試験

(1) 目的

純水素 PEFC システムの燃料系統及び燃料電池セルスタックの気密性を確認し、燃料水素の漏洩が発生しない構造となっていることを確認する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.2.2.3.7-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
試験ガス圧力、漏れ量（内部漏れ流量、圧力降下、外部漏れ）セルスタック温度、周囲大気温度	試験ガスの圧力： ・燃料入口閉止弁まで：システムで規定する供給圧力の1.5倍 ・昇圧器以降：最高使用圧 内部漏れ流量：70mL/h以下（JIA規程） 外部漏れ：漏れなきこと

②データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.2.2.3.7-2 運転ケース及びデータ収集方法

項目	内容
運転方法	①停止状態（燃料入口閉止弁まで、及び昇圧器以降） ②定格発電（ガスを内包する部分）
データ収集方法	停止状態にて、燃料入口閉止弁まで、及び昇圧器以降の測定を行う。その後、起動操作を行い、定格発電到達から30分以上経過後、ガスを内包する部分の検査を行う。

③試験の方法

a)燃料入口閉止弁までの通路は、閉止弁を閉じた状態で、入口部に精密ガス流量計を接続し、その入口側から空気又は窒素によって標準供給圧力の 1.5 倍の圧力を加えて、漏れ量を測定する、若しくは圧力計を接続し、標準供給圧力の 1.5 倍の圧力で安定してから空気又は窒素の導入を遮断し、圧力降下を測定する。また、昇圧器以降について、空気又は窒素によって最高使用圧力の 1.1 倍の圧力を加えたとき、漏れ量を測定する。

b)ガスを内包する部分にあっては、ガスを通じた上で、発泡液、検知器などで各部からの外部漏れがないことを確認する。

(3) データ収集の実施

窒素ガス及びヘリウムガスにて圧力変化から漏れ量を算出した結果、ともに漏れ量は 0.178mL /h となり、基準の「70mL/h 以下」より少ないため、漏れなしと判断した。

(4) 評価方法の検討

燃料入口閉止弁までの区間について、改質型 PEFC システムの JIS 規格では、都市ガス、LP ガスの供給基準をベースに、気密性試験時の圧力を 4.2kPa と明記している。これは、LP ガスの標準供給圧力である 2.8kPa の 1.5 倍として定められたものとされている。純水素 PEFC システムにおいては、燃料ポンベからの供給形態が考えられるため、システムによってはより高い圧力での燃料供給が想定される。今回実機試験をおこなった供試体でも、小出力発電設備の上限圧力(0.1MPa)に近い圧力で燃料供給する設計のものがみられた。こういった状況を踏まえ、気密性試験時の圧力を標準供給圧力の 1.5 倍とした。

2.2.1.2.2.4 成果の活用

(1) 安全性評価試験方法の検討

純水素 PEFC システムの安全性に関するデータ収集を実施して、平成 18 年度までに当初予定していた 6 項目の安全性評価試験について、検討を完了した。

また、試験方法の検討に際して、純水素 PEFC システムのシステム構成や運転特性、各種安全対策や安全装置作動時のシステム挙動など、多様な仕様の純水素 PEFC システムについて安全性に係る知見を得た。

これらの成果を消防法関連法規の規制見直しについて審議する総務省消防庁の検討委員会に提供し、規制再点検の議論に活用された。

電気出力 10kW 未満で常圧型(燃料・改質系統設備の最高使用圧力 0.1MPa 未満)の PEFC システムの設置離隔距離の短縮、設置届出の不要化、逆火防止装置の不要化(消防法関連)に関する調査・机上検討を行なって得られた知見と、実機試験を通じて得られた安全性データや知見(例えば 2.2.1.2.2.2.2 「設置離隔距離試験」、2.2.1.2.2.2.4 「高温部における安全性試験」など)を、規制適正化を審議する「固体酸化物型燃料電池発電設備等の安全対策の確保に係る調査検討会」(事務局：消防庁)に提出し、安全性に関する審議に付された。

この結果、平成 19 年 2 月 21 日に本検討会における審議が完了し、純水素 PEFC システム本体については、改質型 PEFC システムと同等レベルの安全性を有しているとの審議結果を得た。一方で、システム本体へ原燃料として供給する純水素の供給配管等を含めた「全体システムも考慮したより詳細な火災予防上の安全性の検討が必要と考えられ、継続して検討していくことが求められる。」と結論されており、条文改正については保留となった。

(2) 性能試験方法の検討

各種性能試験については、純水素 PEFC システムに特有の仕様や運転形態などをまとめたうえで、重点的に検討すべき試験項目を抽出した。そして、これらについて、実機試験による検討も含め、PEFC-JIS 規格をベースに作成した純水素 PEFC システムの試験方法案の妥当性検証や加筆変更を進め、これまでの検討内容を反映した純水素 PEFC システムの試験方法変更案を作成した。表Ⅲ2.2.1.2.2.4-1 に純水素 PEFC システム試験方法変更案に関する検討結果の一例を示す。

さらに、作成した純水素 PEFC システム試験方法変更案の内容と国際標準の内容を比較検討し、国際標準との整合化案を取りまとめた。これら純水素 PEFC システム性能試験方

法の検討成果については、2.2.1.5 章に記載の定置用燃料電池の国際標準（IEC）改訂検討の場へ提供した。

表Ⅲ2.2.1.2.2.4-1 純水素 PEFC システム試験方法変更案の検討結果の一例
（PEFC-JIS 規格ベースからの変更）

試験	PEFC-JIS 規格ベースの純水素 PEFC 試験方法の内容	純水素 PEFC 試験方法変更案の内容	変更のポイント
点火・燃焼試験	燃焼検知手段、製造業者の示す方法による測定	オフガス燃焼部温度、オフガス燃焼部火炎による測定	改質器がないため、オフガス燃焼部での触媒燃焼で判断
	起動開始からオフガス切替後、炉内温度が安定するまで	起動開始から水素供給弁が開き、炉内（オフガス処理機など燃焼部含む）が一定温度以上となるまで	
	水素濃度測定の記載なし	水素濃度測定を追加	オフガス燃焼部の燃焼スリップの確認
負荷変動特性試験	定格発電1時間以上経過後に測定	定格発電30分以上経過後に測定	純水素機のシステム安定特性を反映
負荷追従特性試験			
気密性試験	4.2kPaの試験圧力	システムで規定する水素供給圧力の1.5倍の試験圧力	配管供給、ボンベ供給等の多様な水素供給圧を勘案した試験圧力
排ガス測定試験	排ガス中のNO _x 、SO _x を測定	NO _x 、SO _x 削除。水素濃度測定を追加	オフガス燃焼部の燃焼スリップの確認
	工程ごとに各成分の平均値を記録	水素濃度は、全行程の平均値と1分間移動平均値の最大値を併記	
耐風・耐雨試験	燃焼検知手段、製造業者の示す方法による測定	オフガス燃焼部温度、オフガス燃焼部火炎による測定	改質器がないため、オフガス燃焼部での触媒燃焼で判断
	水素濃度測定の記載なし	水素濃度測定を追加	オフガス燃焼部の燃焼スリップの確認

表Ⅲ2.2.1.2.2.4-2 に、国内 WG3 及び WG4 へ提案した整合化案の一例を示す。国内 WG3 では、純水素燃料電池の定義を明確にした上で、純水素 PEFC システム特有のセルスタック出口のオフガスを処理するオフガス燃焼部に関わる安全規定として、点火・失火判定に係わる規定や、燃焼不具合時の水素スリップを想定した水素濃度排出基準値の規定を追加することが承認された。また、気密性試験の整合化検討では、純水素型や改質型を含めて燃料供給バルブの内部リークに関する安全要件が IEC に規定されていないため、日本の PEFC-JIS 規格や技術基準等を参考に出力 10kW 未満の燃料電池に限定した上で、燃料供給圧力が 2.8kPa 以上の場合は、その 1.5 倍を気密試験の圧力とし、漏れ基準値は日本の技術

基準に準じた 70mL/h 以下とする内容で承認された。

一方国内 WG4 では、水素燃料を使用する燃料電池に限定して、排ガス測定項目を見直し、不要な測定項目の省略を可とすることが承認された。これらの国内 WG3 及び WG4 にて審議・承認された内容は、国際標準改定の審議を行う国際 WG の場において、日本からの提案として審議される予定である。

表Ⅲ2.2.1.2.2.4-2 国際標準 (IEC) との整合化案の一例
(国内 WG3 及び WG4 への提案内容)

提案項目	国際標準 (IEC) の規定内容	整合化案	整合化のポイント
点火・ 燃焼試験	純水素 PEFC のオフガス燃焼部に相当する安全規定がない	オフガス燃焼部の点火及び失火判定に係わる安全要件を追加	改質器がないため、オフガス燃焼部での触媒燃焼で判断
	排ガス中の水素の排出濃度基準値に係わる規定がない	純水素 PEFC の場合は、CO の代わりに水素濃度 1%未満 (LFL の 25%) の排出基準値を追加	オフガス燃焼部の燃焼スリップの確認
負荷変動特性試験	定格発電 1 時間以上経過後に負荷変動を実施※	定格発電 30 分以上経過後に負荷変動を実施	純水素 PEFC のシステム安定特性を反映
気密性試験	システム内部の燃料供給弁の内部リークに関する安全規定がない	純水素 PEFC の場合は、燃料供給圧力の 1.5 倍での試験圧力	配管供給、ボンベ供給等の多様な水素供給圧を勘案した試験圧力
排ガス測定試験	排ガス測定項目として、NO _x 、SO _x 、THC 等が規定※	純水素 PEFC の場合は、排ガス測定項目は水素と酸素のみ。	水素燃料を使用するため、排ガス測定項目の見直し
耐風試験	風条件下において CO 濃度 300ppm の排出濃度が規定	純水素 PEFC の場合は、CO の代わりに水素濃度 1%未満 (LFL の 25%) の排出基準値を追加	オフガス燃焼部の燃焼スリップの確認

※WG4 の小形 PEFC 性能試験法 (IEC62282-3-201) の規格原案 (WD) に規定された内容

2.2.1.3 系統連系時の課題対応

2.2.1.3.1 単独運転検出技術の確立

2.2.1.3.1.1 研究の概要

家庭用 PEFC システムは、普及を促進するための大規模実証事業や研究開発が実施されている。本格的な商用化にあたり同一トランス下に多機種の燃料電池が設置されることが予想され、燃料電池システムを商用電力系統から解列する PCS の単独運転検出機能の相互干渉による遅延の問題が顕在化してきた。本研究では、複数台時に干渉が起りにくい検出方式を選定し、その方式による単独運転検出機能の信頼性を評価するため、シミュレーション解析と PCS 実機試験の 2 つの観点から技術的な検証を行った。

2.2.1.3.1.2 背景

既に出荷台数が20万台以上となっている太陽光発電（以下、「PV」とする）用PCSは10数社で製品化されており、その能動的単独運転検出方式は各社異なる方式を採用しており、その合計は約20種類に達している。そのような状況において、FC用PCSも各社別々の方式を採用して出荷された場合は、異なる単独運転検出方式の組合せ数が飛躍的に増加し、相互干渉により単独運転が検出できない可能性が高まり、電力系統の信頼性・安全性の維持に問題が生じる恐れがある。

燃料電池は、平成17年度からの3ヶ年での大規模実証事業を経て、平成20年度から商用期を迎える計画であり、現時点でFC用PCSだけでも単独運転技術を標準化することができれば、電力系統の信頼性・安全性の維持に貢献することができる。

しかし、FC用PCSの開発現場においては、より低コスト、コンパクト化が要求されており、PCSのソフト変更だけで対応するなど要求を満たし、かつ干渉が最も起りにくいとする方式が必要である。

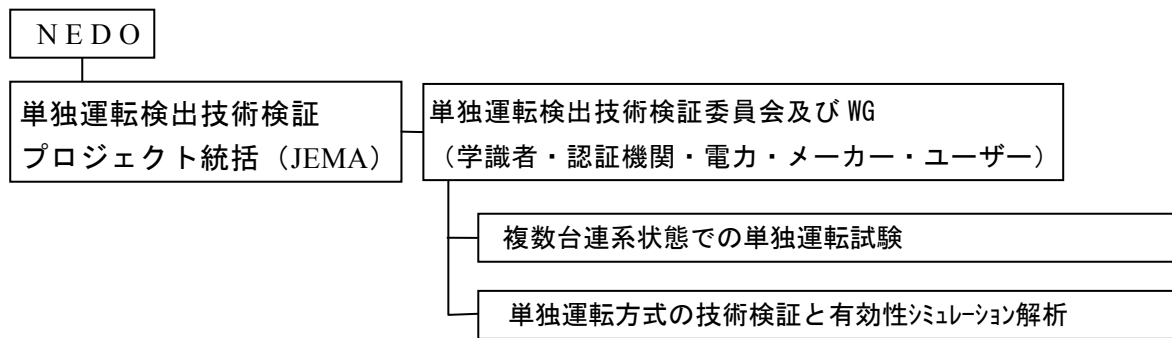
2.2.1.3.1.3 研究目的

分散電源である定置用燃料電池には、配電線への連系における単独運転を防止するための機能として、能動信号方式による検出機能がPCSに備えられているが、配電線に複数台の分散電源が集中連系した場合には、単独運転防止機能が、他の単独運転防止用の能動信号との相互干渉によって単独運転検出ができない可能性が懸念されている。

この問題を解決するため、既存の能動的単独運転検出方式の中で、他方式との相互干渉が起りにくい方式を調査選定し、その信頼性、安全性を評価・検証し、燃料電池の複数台の配電線への連系における技術的な問題を解決することを目的とする。

2.2.1.3.1.4 研究体制

JEMAに関係者からなる検討委員会を設置し、成果のとりまとめ評価・確認と実運用に際しての認識の共通化を図る。選定方式の技術検証シミュレーションおよび実機検証試験は専門機関・企業等にて実施する。体系図を以下に示す。



図Ⅲ2.2.1.3.1.4-1 研究体制

2.2.1.3.1.5 研究内容

(1) 能動的単独運転検出方式の選定

既存の能動的単独運転検出方式の中で、他方式との相互干渉が起こりにくいと評価されている選定方式を評価し、本研究の検出方式の選定を行う。

(2) 単独運転検出機能の評価・検証

選定方式によるシミュレーション解析と PCS 実機試験の 2 つの観点から技術的な検証を行ない、単独運転検出機能の信頼性、安全性を評価する。

①選定方式の検出有効性の解析・検証

原理上系統連系時に周波数変動が無ければ能動信号を出さない方式であるため、各所の検証試験で他方式との相互干渉が起こりにくいと評価されている選定方式について、単独並びに複数台連系を想定した検出有効性についてのシミュレーション解析と理論的評価を行う。(平成 18 -20 年度)

②選定方式の PCS 搭載複数台連系での実証試験・研究

PV 関連プロジェクトの検討分科会での複数台連系試験方法の検討結果や、複数台連系試験方法の JIS 化分科会での検討結果に基づき、選定方式を組み込んだ 1 社及び 2 社の PCS による 10 台 (平成 19 年度実施) 並びに数社の PCS による 20 台程度 (平成 20 年度実施) の複数台連系試験を実施し、相互干渉しないことを検証・確認する。(平成 19-20 年度)

③評価・検証方法の検討

上記、①、②の研究を行うこととするが、①の理論研究により、完全に相互干渉が起こらないことが完全に確認できた場合には、②の実証研究を変更する。

2.2.1.3.1.6 まとめ

他方式と相互干渉が起こりにくいと評価した方式を、A~F 社 (計 6 社) の PCS に組み込んだ複数台連系におけるシミュレーション解析と PCS 実機による実証試験によって有効性の検証を行った。

(1) 能動的単独運転検出方式の選定

① 選定対象

「系統連系規定 JEAC9701-2006」に記載されている既存の能動的単独運転検出方式の中で相互干渉が起こりにくい方式を対象に選定した。

調査対象とした方式は、以下の通り。

- ア. 周波数シフト方式
- イ. 有効電力変動方式
- ウ. 無効電力変動方式
- エ. 負荷変動方式
- オ. スリップモード周波数シフト方式

能動的単独運転検出方式の例を表Ⅲ2.2.1.3.1.6-1 に示す。

② 選定結果

原理上系統連系中に周波数変動が無ければ能動信号を出さない方式であるため、他の方式との間でも干渉が起こりにくいと評価されている「スリップモード周波数シフト方式(以下、「S方式」とする)」を選定した。

表Ⅲ2.2.1.3.1.6-1 能動的単独運転検出方式の代表例

周波数シフト	無効電力変動(Q変動)	スリップモード周波数シフト
<p>系統周波数に対して、一定周期で出力周波数をシフトさせ、系統周波数に変化があればシフト方向を固定し、これが0.5秒以上継続したら、ゲートブロックおよび連系リレーを解列する。(能動信号：有)</p>	<p>皮相電力に対する無効電力の割合に応じた位相で、進相と遅相を交互に変動させる。系統周波数の定格周波数からのずれに応じて変動の中心をずらす。0.4Hz以上の周波数変化が生じた場合、単独運転と判断し、ゲートブロック処理後、連系リレーの解列を行う。(能動信号：有)</p>	<p>定格周波数からの周波数変化に対して、出力電流位相をシフトさせる特性を持たせることにより、有効・無効電力平衡時にも生じる微小な周波数変化を正帰還して、周波数異常で検出するように周波数を発散させる。(能動信号：無)</p>
<p>(2) 制御動作例</p> <p>インバータの出力周波数、系統の周波数、周波数変化の割合、ゲートブロック及び連系リレー解列、単独運転開始、周波数変化の割合、0.5秒、系統周波数が変化しないのでシフト方向を変化させる。</p>	<p>電力変動タイミング図</p>	<p>出力電流位相特性、位相、進み、遅れ、負荷電流特性例、周波数、定格周波数f_0、$f_0 \pm 3\text{Hz}$</p>

(2) 本プロジェクトの成果総括 (シミュレーション)

本プロジェクトのシミュレーション関係の成果を総括すると以下のとおりとなる。

① 検出有効性に関するシミュレーション解析

- 1) S方式を採用した場合、最初にPCS 1台の場合について、負荷種別による周波数変化の挙動の差異について解析した。次に、PCSの台数を10台まで増やしたが、検出時間が伸びていく現象は認められなかった。台数が変化しても、連系点の有効電力・無効電力

および負荷の相対的な比率が変わらなければ、ほぼ同じ周波数の挙動となり、複数台の PCS はほぼ同一の動きとなると考えられる。

- 2) また、PCS 出力が定格に比べて小さい場合には、周波数の変化が緩やかになり、受動方式の周波数変化率が動作するケースが見られた。出力が異なる PCS を組み合わせても相互に干渉することは発生しないが、周波数変化の挙動はそれぞれ単独の場合との中間的な結果となる。
- 3) 異機種との組合せを想定した場合、定格容量と主回路定数が異なっても、相互干渉による影響は認められなかった。ただし、条件の変更範囲は限定されているので、さらに広い範囲で変更した場合（検証試験での組合せを想定して）の動作確認は②の実証試験を想定したシミュレーション解析の中で評価した。
- 4) 高压系統を介して複数台の燃料電池が単独運転状態となった場合にも、単独運転検出の相互作用に伴い周波数変化の挙動が変化する現象は認められなかった。これは、S 方式の原理上、各 PCS の能動信号の注入量は周波数のみに依存するが、周波数は 1 つの系統内では同一の値であり、低压系統内の相互接続でも高压系統を介した接続でも違いは生じないためである。

②実証試験を想定したシミュレーション解析

- 1) 最初に PCS 1 台の場合について①で実施したシミュレーション解析と同じ傾向が得られることを確認した。また、PCS の台数を 3 台まで増やした場合や、モータ負荷との組合せ台数を変化させた場合の挙動を評価したが、単独運転検出の相互作用により、周波数変化の挙動が大きく変化して検出時間が長くなるといった現象は認められなかった。
- 2) 実証試験との比較結果より、周波数が上昇する場合、低下する場合を例に、系統電圧の上昇／低下の変化方向や PCS の有効電力・無効電力の変化方向は一致することを確認したが、周波数が低下するケースでは実証試験の方が相対的に変化速度が遅くなることを確認した。これを踏まえ、モータ負荷の磁気回路飽和特性をシミュレーションモデルに反映することで、周波数低下時に変化速度が緩やかになる現象が再現することを確認した。
- 3) さらに、A 社+B 社～F 社の 2 台の組合せ、および、3 社 9 台、6 社 18 台までの多数台連系についてもシミュレーションを行い結果を評価した結果、PCS の挙動はメーカーにより差異が生じるものの、単独運転の検出時間が伸びる現象は認められなかった。
- 4) PCS 台数が増加した場合や、複数メーカーの組合せの場合でも平均の単独運転検出動作時間が増加していないことより、18 台を超える場合であっても、選定方式の単独運転検出方式は能動信号の相互干渉が原因で動作時間が変わらない可能性が高いことを示唆している。

③動作メカニズムの解析

- 1) 単独運転検出の有効性を理論的に確認するために、最初に、燃料電池システムと定インピーダンス負荷から構成される単独系統について、定常的な動作メカニズムの整理を行い、安定性（不安定であること）の評価結果を示した。
- 2) さらに、負荷モデルとして、LCR 負荷のみでなくモータ負荷が存在する場合も含めて、

線形モデルを構築して解析を行った結果、不安定である（周波数が発散傾向を示す）ことを確認した。

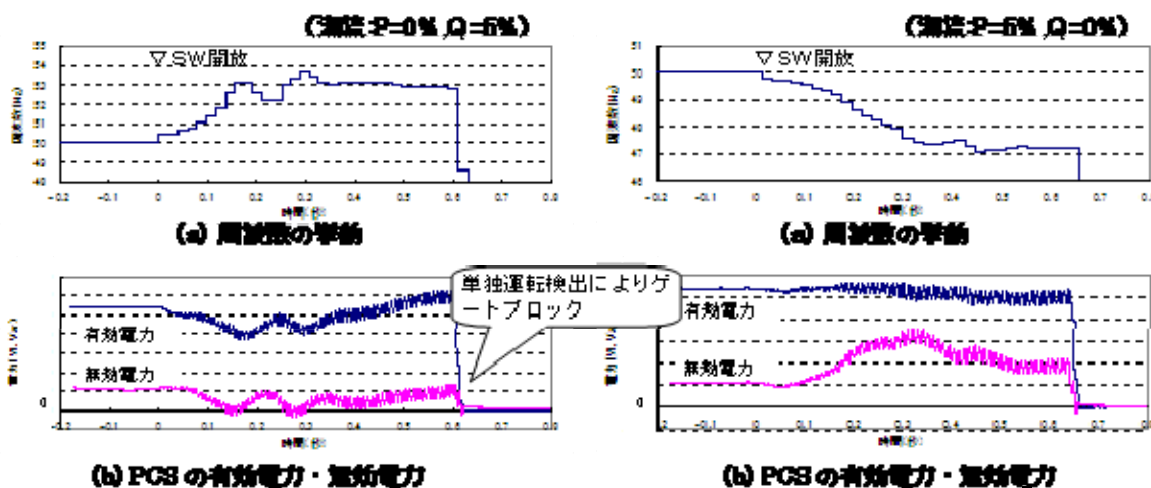
(3) 本プロジェクトの成果総括（実証試験）

本プロジェクトの実証試験の成果を総括すると以下の通りとなる。

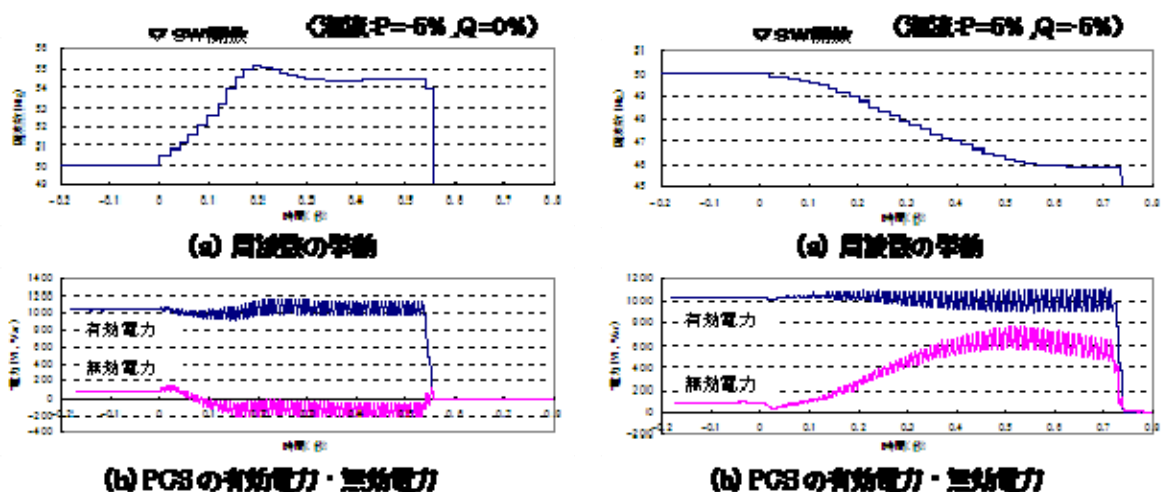
- ① 主回路構成や制御方式の異なる 6 社の PCS に周波数-位相特性を統一した S 方式を組み込んだが、単独運転検出特性に大きな差はなく、PCS 単独での検出有効性は問題ないことを確認した。図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-1 と図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-2 にそれぞれ B 社と D 社の PCS1 台の単独運転検出特性を示す。なお、A 社 PCS1 台についてはここでは省略するが、図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-3 と同様な傾向を示している。

B 社単独時の PCS 無効電力は、A 社のみの場合と概ね同じ動きであるが、スイッチ開放後 0.05~0.1 秒程度遅れてから無効電力の動きが大きくなる傾向が見られる。

D 社単独時の PCS 無効電力も、A 社のみの場合と概ね同じ動きであるが、D 社のほうが全般的に滑らかに変化する一方、変化のスピードが遅く見え、特に周波数が低下方向で顕著である。このようにメーカー間で挙動の違いが見られるのは、周波数検出時のフィルタリング処理や、位相シフト操作における平均化処理などについては、今回指定せず各社の仕様としたために位相シフト(=周波数変化)のスピードに差が生じたものと考えられる。ただし、挙動の違いは瞬時瞬時で比較した場合に生じるもので、単独運転検出の性能面に対しては問題が生じていない。



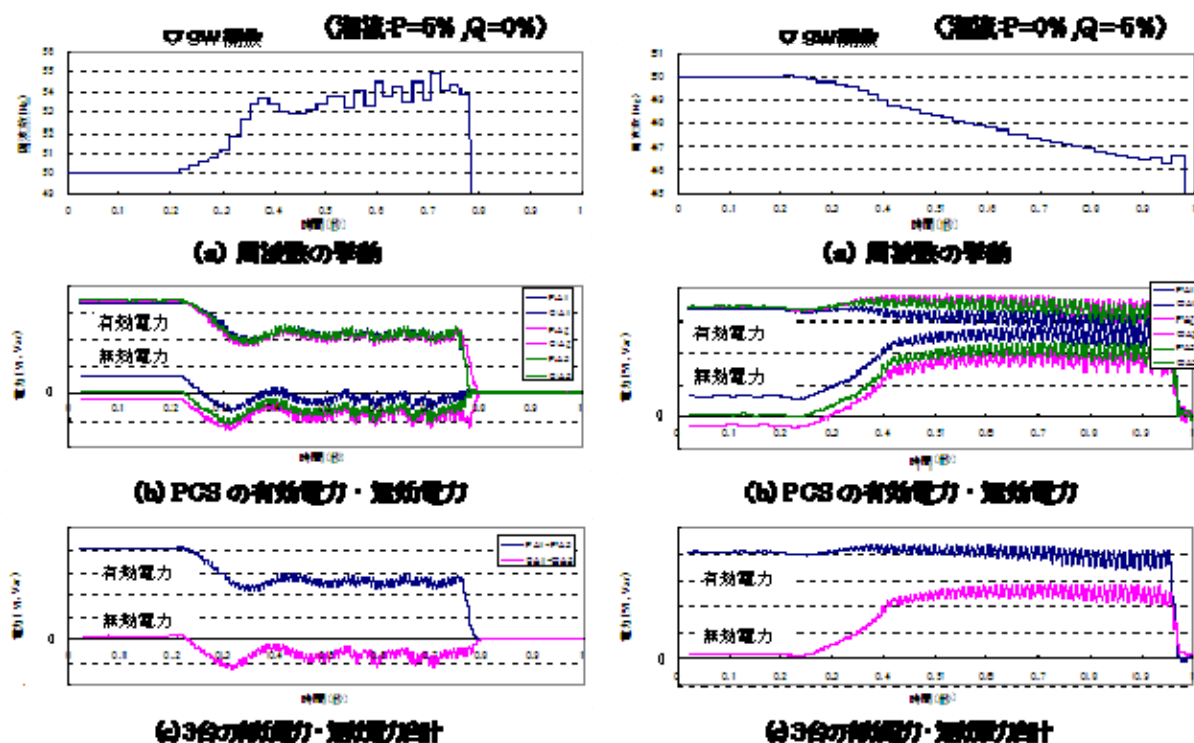
図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-1 B 社 PCS 単独運転時の周波数・無効電力の挙動



図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-2 D社 PCS 単独運転時の周波数・無効電力の挙動

② 同一メーカーの PCS2 台並びに 3 台での試験においても、全ての負荷条件での動作時間は 1 秒以内となった。同一メーカー (A 社) の PCS3 台の組合せ試験時の周波数と各 PCS 無効電力の挙動を図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-3 に示す。各図の無効電力の挙動に着目すると、複数台の PCS の無効電力は若干の初期値の違いはあるものの、SW 開放により単独運転に移行した後は同期して変化している。

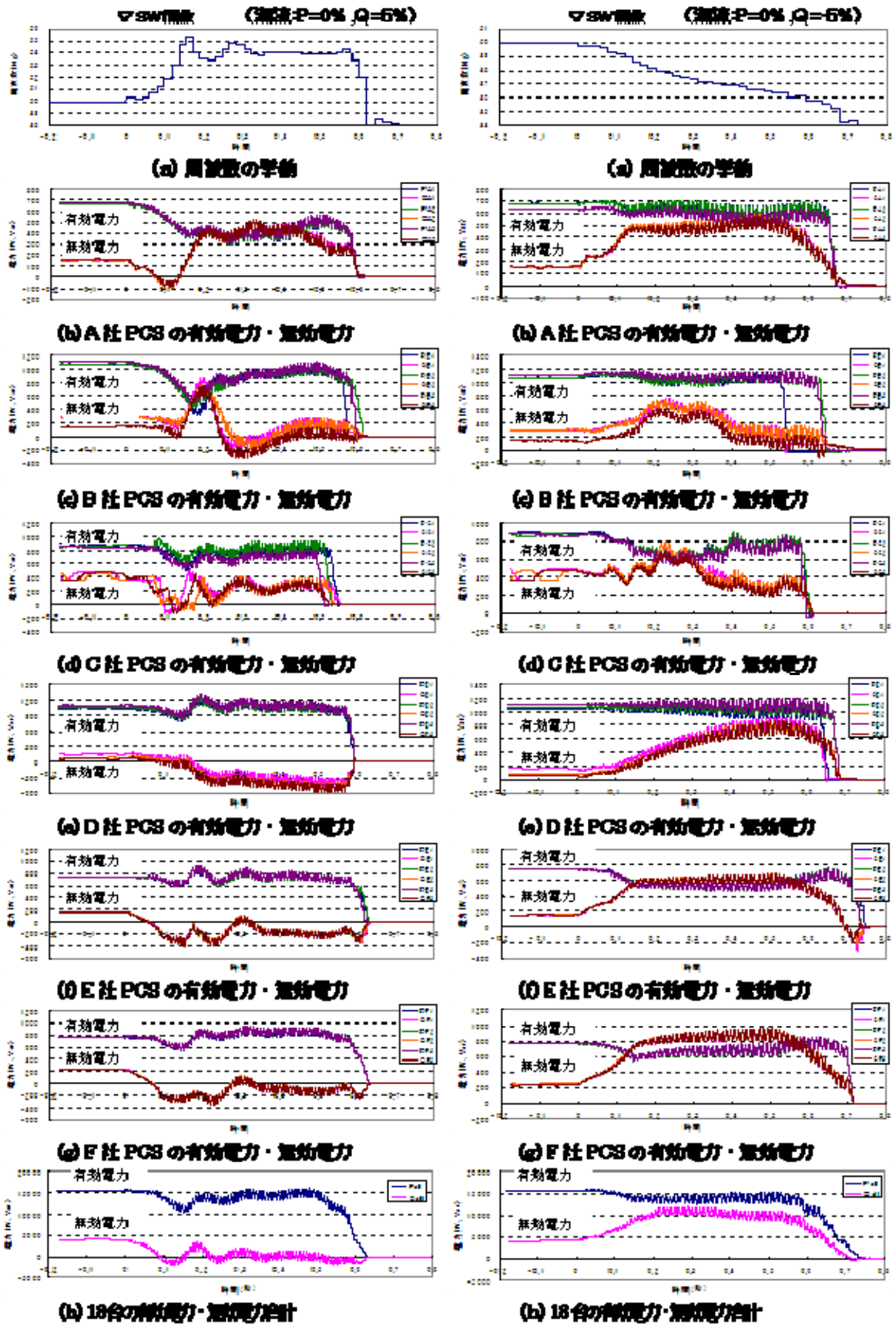
従って、同一メーカーの PCS が複数台連系された場合は、個々の S 方式の能動機能が干渉する傾向は認められない。



図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-3 A社 PCS3 台単独運転の周波数・無効電力の挙動

③ 異メーカーの PCS を 1 台ずつの組合せにおいても、全ての負荷条件での動作時間は 1 秒以内である。異なる 2 社（A 社+D 社）の PCS 2 台の組合せ試験時の周波数と各 PCS 無効電力の挙動を図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-4 に示す。

異メーカーの PCS 組み合わせでは、スイッチ開放により単独運転に移行直後に周波数の変化に伴う無効電力の大まかな挙動（増加方向か減少方向か）はメーカーが異なっても一致しているが、瞬時瞬時で比較してみると 2 台の動きは異なるように見える。しかし、無効電力出力が異なる理由は、各 PCS が出す能動信号が阻害するように動作しているためではなく、(3)①項でも述べたように S 方式の動作に関わる周波数の検出遅れや、平均化処理によって各社の PCS の制御スピードが異なるために生じているものであると推定される。これを確認するために、PCS 出力の合計を算出してみると各図(c)に示すように、それぞれ 1 社のみで試験した場合の平均的な挙動を示している。単独システムの周波数の挙動はここで示した合計の無効電力と負荷との相互作用で決まることより、異メーカーの PCS 間で無効電力出力の差があっても全体としての単独運転検出時間に影響せず、現状の能動方式に要求される 0.5～1.0 秒で検出している。

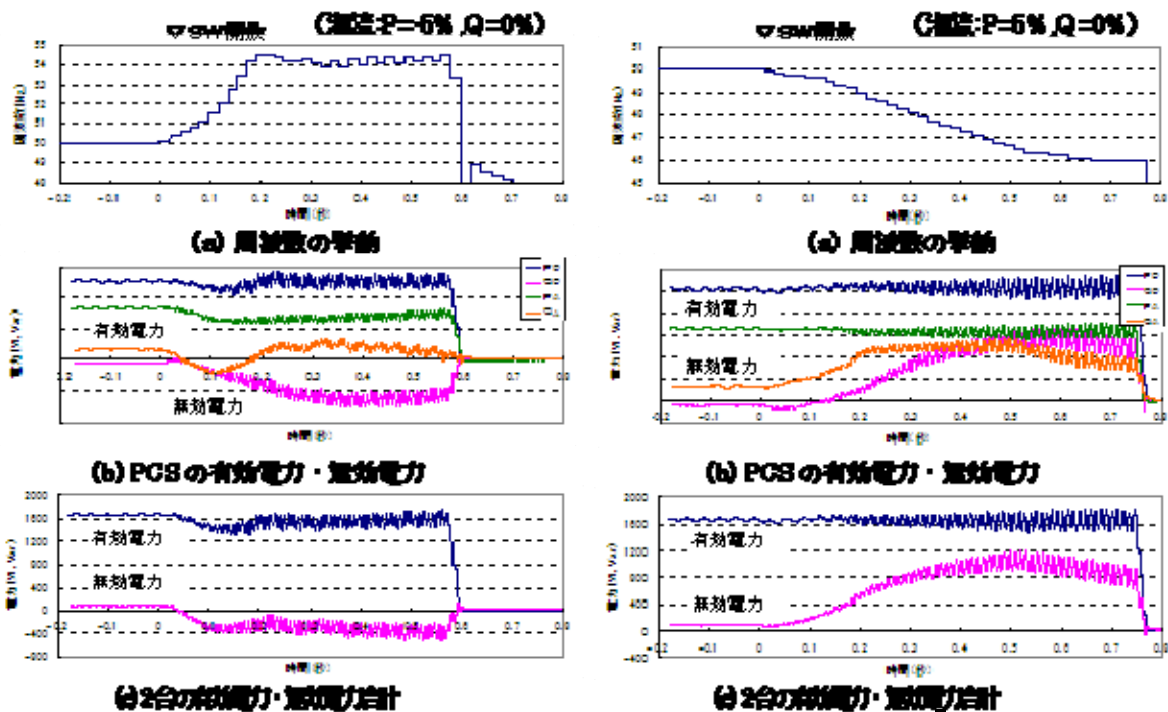


図Ⅲ.2.2.1.3.1.6(3)-4 A社、D社のPCS2台の単独運転時の周波数と無効電力の挙動

④ 3社各3台計9台での試験，並びに6社各3台計18台の試験においても，全ての負荷条件での動作時間は1秒以内であり，かつ連系台数の増加により動作時間が長くなる傾向も認められなかった。PCS 18台（6社各3台計18台）の組合せ試験時の周波数と各PCS無効電力の挙動を図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-5に示す。

(b)～(g)より，各社の3台のPCSは，初期値の違いを除いてほぼ同じ動きをしていると言える。また，6社間では一見違いがあるように見えるが，18台の合計の無効電力を見ると，各社PCS単独で試験した場合の結果の平均とほぼ同じ挙動であることが確認できる。

以上より，異メーカーのPCSが多数台連系された場合でも，制御応答の相違により無効電力のやり取りは部分的に生じるが全体としては同じ方向に無効電力が変化するので周波数の変化速度には影響しないといえる。従って，単独運転検出に対しては問題ないといえる。



図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-5 6社PCS各3台計18台連系時の周波数・無効電力の挙動

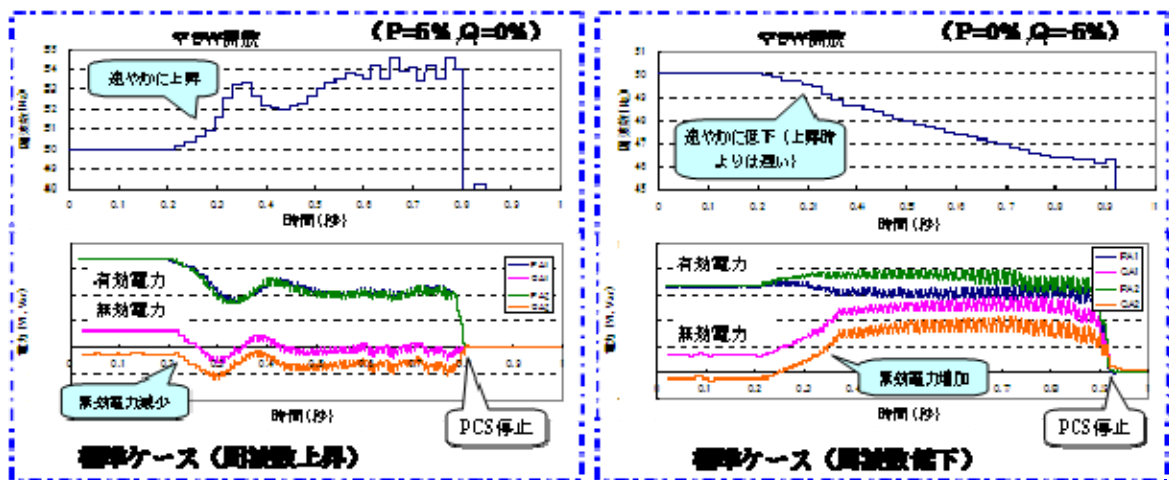
⑤ S方式を組み込んだPCS1台と，異なる能動的単独運転検出方式を持つ太陽光用PCS1台との組合せ試験においても，全ての負荷条件において1秒以内に検出されており，今回試験した2種類の他方式のどちらについてもS方式と組合せにより検出時間が延びることがないことが確認できた。

⑥ S方式を組み込んだPCSの1台から18台までの組合せ試験並びに太陽光用PCSとの組合せ試験結果において，開放点の潮流条件により周波数が上昇するケースと低下するケースがあるが，周波数低下時の検出時間が相対的に長くなる傾向があることが判明した。各組み合わせ試験における25点の各負荷条件での単独運転移行から検出までの間の周

波数の挙動は、表Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-1 単独運転試験の負荷条件の領域Aにおいては上昇方向となり、領域Bにおいては低下方向となる。その間の領域は元々周波数が変わりにくい領域であることから周波数が上昇するケースと低下するケースが混在する。

表Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-2 単独運転試験の負荷条件

		送電 P 受電				
		-10%	-5%	0%	5%	10%
遅れ Q 進み	10%	23	18	3	8	13
	5%	22	7	2	7	12
	0	21	16	1	6	11
	-5%	24	19	4	9	14
	-10%	25	20	5	10	15



図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-6 周波数上昇時の挙動

図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-7 周波数低下時の挙動

領域Aでの周波数上昇時及び領域Bでの周波数低下時の標準的な周波数挙動を図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-6 と図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-7 に示す。図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-6 では、単独運轉移行後に無効電力が減少し、それに伴い周波数は速やかに上昇しており、5 サイクル程度で閾値である 51Hz を超え、保護時限 (0.5 秒) 経過後に PCS 停止に至っている。本図の周波数が上昇するケースでの単独運転検出時間は 0.6 秒前後となっている。

一方、図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-7 のように周波数が低下する場合は、無効電力増加に伴い、周波数が低下するが、上昇時より遅いレートで周波数が低下している。これは本プロジェクトの単独運転試験に使用している回転機負荷が単独運轉移行後の電圧上昇により磁気飽和し、以下のように作用するためである。即ち、回転機負荷は磁気回路の飽和により無効電力の消費量が増加する。一方、スリップモードの作用により PCS から注入する無効電力は周波数低下に伴い注入量を増加するように変化する。本来は無効電力の注入量増加は電圧位相を遅らせて周波数の低下を加速する方向に作用するはずであるが、回転機負荷の無効電力消費が増大することにより電圧位相の変化が小さくなり周波数の変化が阻害されるためである。

この回転機磁気飽和により周波数変化レートが小さくなることに加え、周波数低下時の単独運転検出閾値と定格周波数との差が上昇時の差よりも大きいため、閾値(48.5Hz)を下回るまでの時間が10サイクル程度と長くなり、周波数が低下するケースでの単独運転検出時間は保護時限も含めて0.7秒前後となり、周波数上昇時よりも検出時間が長くなっている。

図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-8は回転機負荷の飽和の影響を確認するために、周波数が低下する負荷条件において、回転機負荷を除外した時の試験結果であり、回転機負荷有りの場合に比べて周波数低下速度が早まり、上昇時とほぼ同じレベルとなっている。

また、図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-9に示すようにA社PCS3台と回転機負荷1台との組合せ試験でも周波数低下時の変化速度が影響をほとんど受けていないことから、回転機負荷容量とPCS出力容量との比が大きいほど、回転機負荷の磁気飽和による単独運転検出特性への影響が大きくなると考える。

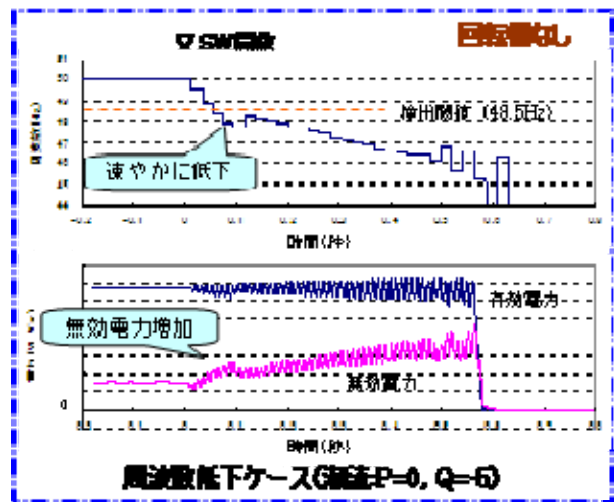
なお太陽光用PCSの場合は定格容量が燃料電池用よりも3-5倍程度に大きいため、磁気飽和の影響は受けにくいと推定される。

⑦ 周波数が上昇するケースと低下するケースにおいて、回転機負荷の飽和と保護検出閾値の差により、検出時間が異なるが、周波数の変化方向に関係なく、定格周波数からの動き出しが遅くなる場合と一旦ある方向に動いた後で逆方向に周波数が変化する場合が特異ケースとして図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-10のように発生している。

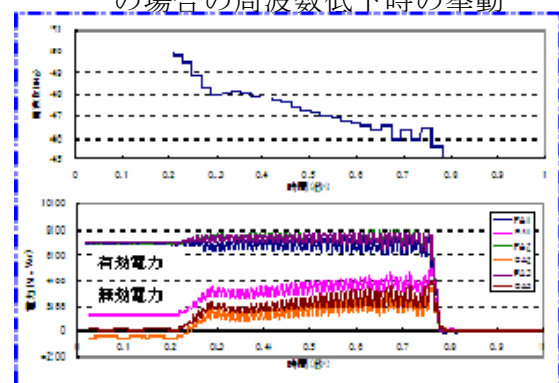
この現象は、負荷条件19, 25などの周波数が変化しにくい点で、かつQが進みの場合に発生している。しかし一度逆方向に動いた場合でも、1サイクルで戻っており、動き出しが遅いケースでも長くても10サイクル程度で通常の周波数上昇、低下の変化レートで変化するようになっている。

これらの現象が、回転機負荷の磁気飽和により周波数変化レートが遅くなり、かつ保護閾値の差が大きい周波数が低下するケースで同時に発生した場合に検出時間が最長となる。本現象は試験ケースの連系台数に関わらず、1台でも18台の場合でも発生している。

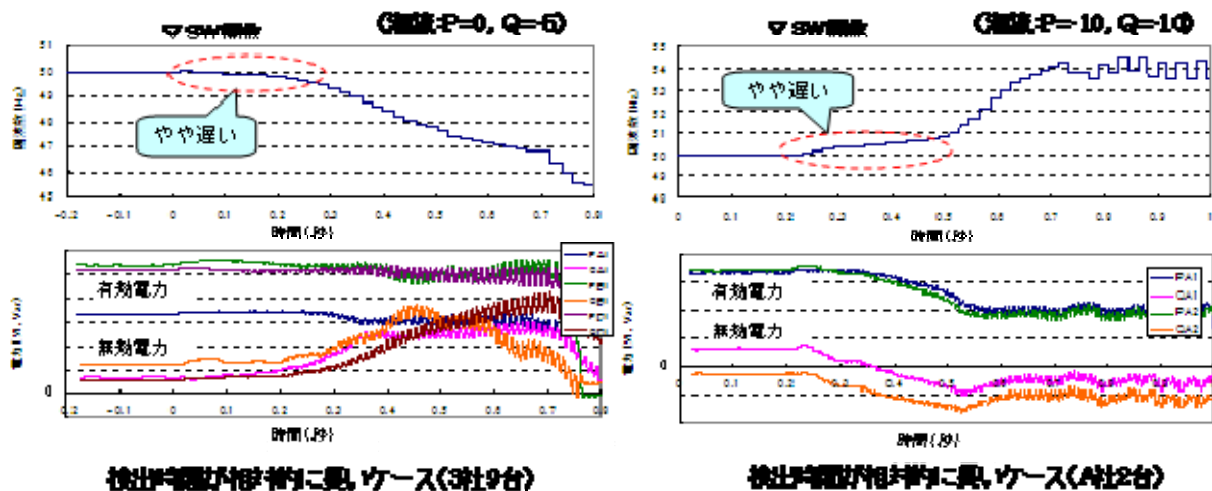
本プロジェクトでPCSの組合せ、台数を変えて負荷条件25点の試験をトータル30回実施した中で、それぞれの検出時間が1秒を超えることはなく、最長でも0.9秒程度で検出している。



図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-8 回転機無しの場合の周波数低下時の挙動



図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-9 A社PCS3台、回転機負荷1台での周波数低下ケース(P=0, Q=-5)



図Ⅲ.2.2.1.3.1.6(3)-10 周波数の動き出しが遅いケースでの挙動

(4) 考察

本プロジェクトの成果から以下のことが考察としてまとめられる。

- ① S方式を組み込んだ同一PCSが複数台連系されても、各PCSの出力無効電力は同期しており、相互干渉はしない。また主回路構成や制御方法の異なるPCSが複数台連系された場合も、各PCS無効電力の挙動に差が生じているが、全体としては、保護閾値を十分に越えるレベルの周波数変化を生じさせるS方式の基本能動機能(無効電力を出力して周波数を変化させる機能)が働くことが各連系台数における全体の無効電力の挙動から確認できた。従って、S方式を有するPCSだけの複数台連系の場合は、18台までであれば連系台数やメーカーの違いに関わらずS方式の有する基本能動機能は同等に作用し、単独運転検出有効性は良好であり、実用的には問題がないと考えられる。なお、異なるメーカーのPCSが連系している場合の各PCSの無効電力の動きに差が見られるが、全体としてはそれらの変動が平均化されることから、複数台連系において動作速度の異なるPCSが混在し、かつ動作遅れが大きいものが支配的な場合(連系台数の割合が多い場合など)には、その分周波数の変化も遅くなり、検出時間が相対的に長くなるが、その場合でも単機での試験により動作時間が検証されていれば、組み合わせた場合でもそれ以上伸びることは無いので、現状能動方式に要求される0.5~1.0秒の検出には問題ない。ただし、将来的に能動方式の検出時間が短くなる場合には、制御応答速度が問題になる可能性が考えられる。
- ② 今回の単独運転試験は、太陽光用PCSの試験と同じ方法、同じ仕様の回転機負荷を使用して実施している。07年度に実施したPCS台数/回転機負荷台数の比をパラメータとした試験において、PCS1台に対して、回転機負荷を2,3台と増やしていく、即ち相対的に慣性モーメントを大きくすることにより、検出時間が伸びることが確認された。また08年度の試験結果から回転機負荷容量/PCS容量の比が太陽光に比べて大きい燃料電池用PCSの場合は、太陽光用PCSよりも回転機負荷の磁気飽和による影響を受けやすいこと

が判明した。即ち太陽光 PCS よりも厳しい試験条件の下で、18 台までの試験結果として検出時間が 1 秒を超えるケースが皆無であったことと、S 方式を有する PCS が複数台連系された場合の能動機能の動きは台数によらず同じであることを合せて考えると、太陽光用と同じ回転機負荷及び台数で試験した本 PJ での 18 台での連系試験結果は、S 方式を有する PCS 台数での 18 台を超える試験結果と変わらない可能性が高いことを示唆している。

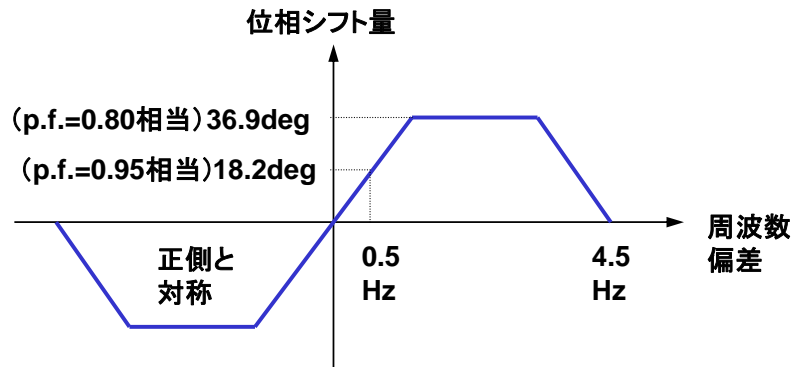
- ③ また太陽光用 PCS のように、今回試験した燃料電池用 PCS に比べて定格容量が 3-5 倍と大きい PCS に S 方式が採用された場合を考えると、定格容量が S 方式の基本能動機能に影響を与えないことから本 PJ の結果と同等であると考えられる。さらに、回転機負荷の慣性モーメントや磁気飽和の影響が軽減されることから、検出時間としては定格容量が小さい場合に比べて短縮される可能性が高い。
- ④ S 方式を有する PCS が複数台連系された場合の能動機能の動きは台数によらず同じであることが確認できたことから、今回の太陽光用 PCS との 1 台同士の組合せでは干渉しないという試験結果は、S 方式を有する複数の PCS 群と太陽光用 PCS1 台との組合せ試験においても同等の結果になると考えられる。
- ⑤ 本 PJ で実施した検証試験は連系システムの周波数を 50Hz として実施したが、60Hz の場合は、保護閾値が異なるだけで、S 方式の能動機能、回転機負荷の磁気飽和の影響等には差異がない。このため図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-11 に示す周波数偏差に対する位相シフト量の特性カーブにおいて、定格周波数の±1%の範囲内で力率を 0.95 以上に維持するために、原点を通る直線の傾きを変えることにより、今回の 50Hz での検証試験結果は、60Hz の場合でも同等となると考える。
- ⑥ シミュレーションモデルに回転機の飽和特性モデルを追加することにより、実証試験と同じ周波数上昇/下降速度となることが確認でき、パワコン単体から 18 台までの連系試験結果とほぼ同等の結果がシミュレーション解析で得られた。
今回 1 台から 18 台までの単独運転検出特性が変わらないことが解析並びに実証試験結果で確認できたことから、18 台を超える台数についても本 PJ で開発したシミュレーションモデルで十分検証できると考えられる。

(5) 今後の課題

① S 方式を規定するための仕様の明確化

今回のプロジェクトでは 6 社の PCS に S 方式を組み込んだが、統一条件としたのは位相シフト特性(図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-11)だけであり、基本的な制御方式等は各社の標準のままとした。そのため周波数変化に影響を与える定格周波数 50Hz (周波数偏差=0) 付近の周波数検出分解能は統一できていないが、各社の周波数分解能は 0.02Hz 以内となっている。前述のように各社独自の PCS に S 方式を組み込んだ結果として、単独運転検出特性は有効であり、かつ複数台の組合せ状態でも単体と同等の能動機能を有することから、位相シフト

特性と周波数検出分解能を規定することで S 方式の統一仕様としては実用上十分であると考えられる。但し、メーカーの異なる S 方式を有する PCS が混在する場合は、他の制御仕様(応答性等)を統一することで、異なるメーカーの PCS 間で生じる無効電力の横流を防止でき、複数台連系時の S 方式の検出特性の更なる改善が図れると考えられることから、S 方式仕様として規定する項目とその内容について規格化されることが望ましい。



図Ⅲ2.2.1.3.1.6(3)-11 周波数偏差に対する位相シフト特性

② 18 台以上の高密度連系状態における技術要件の整理

本 PJ の目的である高密度連系時の課題を解決するためにも、本 PJ の成果を、18 台超の高密度連系時に適用できる要件を整理することが望ましい。(5) ①項の S 方式仕様の規格化により、単独運転移行後の各 PCS の出力無効電力が同期して変化するようになれば、18 台以上でも S 方式間の干渉はないと考えられるが、設置場所の条件等も加味した適用要件の整理が必要である。

③ 太陽光用 PCS との組合せについて

今後の太陽光ならびに燃料電池の更なる普及加速を考えると、(イ) S 方式を有する燃料電池用 PCS 群と太陽光用 PCS1 台の組合せ、また(ロ) S 方式を有する燃料電池用 PCS1 台と複数台の太陽光用 PCS 群の組合せ、さらに(ハ)複数台の燃料電池用 PCS 群と複数台の太陽光用 PCS 群の組合せによる高密度連系状態が発生するケースが想定される。

考察(4) ④項で述べたように(イ) S 方式を有する複数台の PCS 群と太陽光用 PCS1 台の組合せにおいては、干渉による問題発生の可能性は極めて低いと考えられるが、(ロ)(ハ)のケースについては、S 方式を有する PCS と太陽光用 PCS のそれぞれの定格容量(複数台の場合は合計容量)の比率が、本 PJ の試験に使用した S 方式を有する PCS 定格容量(700W)と太陽光用 PCS の定格容量(3kW)との比率に比べて、太陽光用 PCS の容量が少ない比率であれば、(イ)のケースと同様の評価が可能と考えられるが、太陽光用 PCS の容量が多い比率の場合については検証・確認が必要である。

2.2.1.4 小規模定置用燃料電池の安全要件及び設置基準等に係わる検討

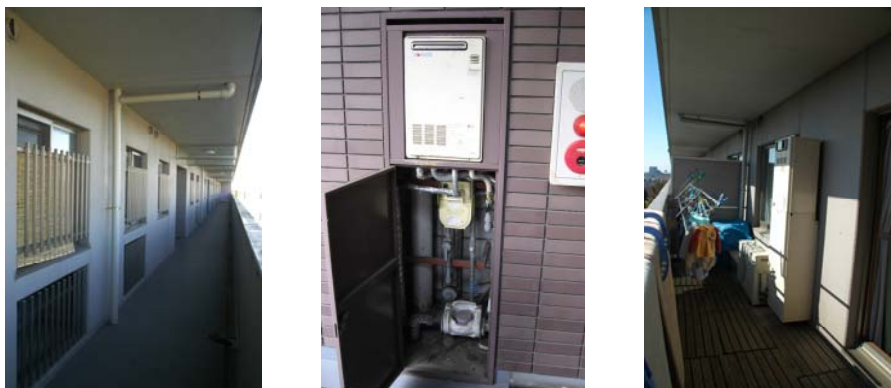
2.2.1.4.1 はじめに

定置用小型燃料電池システムは、現状では戸建て住宅への設置が中心となっているものの、近年マンションのバルコニーやパイプシャフトなど、集合住宅への設置に対応したシステムの開発が一部メーカーで検討され、あるいは試作システムが実際に設置されて導入効果の評価等が行なわれている。

(財)建築物価調査会がまとめた建築統計年報平成17年度版によれば、平成7年から平成16年の10年間の住宅着工件数について、集合住宅の着工数は戸建て住宅数とほぼ同水準と高い上、都心部では集合住宅の割合が高まるため、定置用小型燃料電池システムが集合住宅等に設置可能となれば、市場規模は従来の2倍以上に広がるものと期待される。そしてこのように市場が拡大すれば、生産台数の増加に伴うコストダウンが促進され、戸建て住宅設置も含めてより一層市場が拡大するという好循環を期待できる。

一方、これまで定置用燃料電池システムが導入・設置されることのなかった設置環境下に導入される場合、それぞれの機器仕様あるいはそれぞれの設置環境に応じた安全担保が確保される必要がある。これら安全担保のための設置基準や安全要件は、国内での更なる普及に向けて重要であるだけでなく、こうした新しい仕様の燃料電池システムを将来、海外に導入していくにあたって国際標準化活動を主導的な立場で推進できれば、国内の燃料電池システムの国際競争力向上という点で、極めて有意義な取り組みとなる。

そこで本事業では、平成19年度からの新規実施事項として「小規模定置用燃料電池の安全要件及び設置基準等に関する調査・検討」を提案した。



図Ⅲ2.2.1.4.1-1 集合住宅で想定されている設置環境の例

2.2.1.4.2 調査・机上検討の内容

(1) 設置形態の特定

集合住宅における現状のガス機器設置形態は、大まかには開放（共用）廊下側への設置、バルコニー側への設置、ダクトへの設置と3つに分類されるが、それぞれの分類でユニットの設置場所や設置方法等により、図Ⅲ2.2.1.4.2-1に示す通り更に細かく分類される。しかし、各設置形態における設置可能スペースや設置環境と、定置用小型燃料電池システムの寸法、給排気仕様などの物理的な制約条件を勘案して検討した結果、図Ⅲ2.2.1.4.2-1の中で色をつけた6つの設置形態が優先的に検討すべき範囲であると判断した。

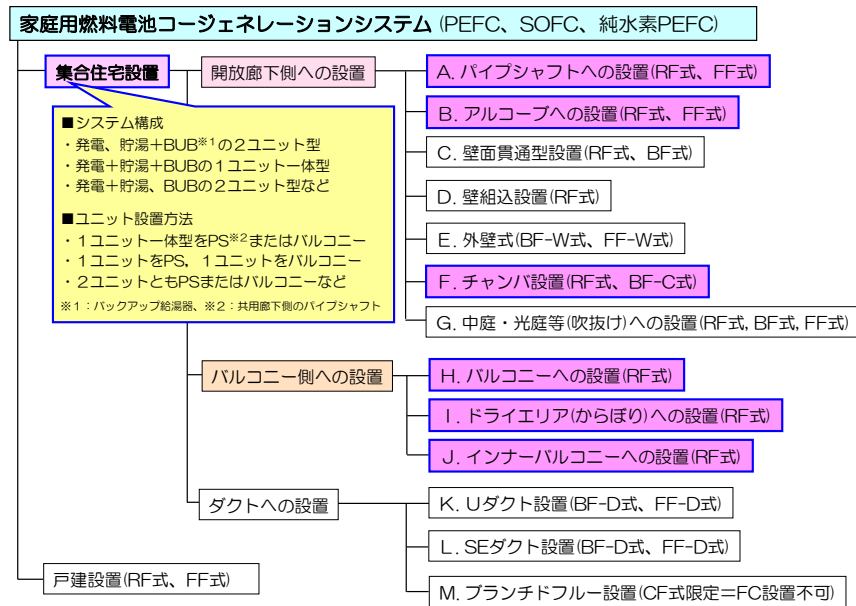


図 III 2. 2. 1. 4. 2-1 設置形態の検討範囲特定結果

(2) 家庭用ガス温水機器及びコージェネレーションシステムとの相違点整理

特定された設置環境を勘案して安全要件等の素案を検討するにあたっては、既に集合住宅に広く導入され、普及している家庭用ガス温水機器等の基準や標準が有益な参考情報として活用できるものと考えられる。そこで各種燃焼機器と PEFC システム、SOFC システム及び純水素 PEFC システムの各種類の定置用小型燃料電池システムについて、実機による運転データの収集を行ない、各種燃焼機器と燃料電池システムの技術上の相違点の有無を調査した。

一般的に定置用小型燃料電池システムは、排ガスの温度や組成、筐体表面温度など、使用者の安全担保や火災予防上の安全担保といった観点で、他の各種燃焼機器と殆ど相違点は無く、各種燃焼機器と同等以上の安全性を有している。

ただし以下に示す通りの相違点があり、特に集合住宅設置を検討する場合には、半密閉空間であるパイプシャフトや高層住宅での強風など、集合住宅特有の設置環境も踏まえた上で、安全担保のための設置基準や要件を検討する必要がある。

- 部分負荷運転を行う時間帯もあり、1日当りの総運転時間が長時間化する傾向にある。また SOFC システムなど、燃料電池システムの種類等によっては連続運転での運用も考えられる。
- 排ガスの温度と吐出風速が低い。
- 燃料電池システムの種類によって、温度や排ガス組成などのハザードとその重要度が異なる。

(3) ハザード分析と実機検証の要否・試験方法等の検討

集合住宅設置(共用廊下側への設置及びバルコニー側への設置)について、実際の設置環境から想定し得るハザードを抽出し、それぞれのハザードがもたらすリスク分析を行った。

表Ⅲ2.2.1.4.2-1に共用廊下側への設置に関連したハザード分析検討項目、表Ⅲ2.2.1.4.2-2にはバルコニーへの設置に関連したハザード分析検討項目を示す。それぞれのハザードについて実機試験の要否を検討した結果、パイプシャフト温度上昇試験、排気還流試験、超高層向耐風試験、給排気閉塞試験の4試験を選定した。これらについて、標準的な試験法と安全担保に資する設置基準等の素案の妥当性を検証するとともに、必要に応じて国際標準等への追加・改善提案として取り纏めることとした。

表Ⅲ2.2.1.4.2-1 ハザード分析検討結果(共用廊下側への設置)

ハザード項目	ハザード詳細	試験要否	実機試験の概要
パイプシャフト(P S)内の空間や内壁など	長時間運転に伴うP S内空間及びP S内壁の異常な温度上昇による火災/火傷リスク	○	①パイプシャフト温度上昇試験 燃料電池特有の長時間連続運転や、パイプシャフト特有の閉鎖環境を考慮した実機検証を実施
	長時間運転に伴うP S内設置したメーター類の温度上昇による誤作動リスク	○	
	長時間運転に伴うP S内配管、ケーブル類の異常温度上昇・延焼による火災リスク	○	
	地震による配管の外れ等によるP S内への可燃性ガス漏洩、爆発、火災リスク	×	実機試験は不要(現行の国内外の基準・標準・実務指針で対応可能)
	昆虫、小動物等の侵入による誤作動リスク	×	
排気ガス(温度・組成)	不完全燃焼による可燃性ガスの排出・滞留による火災/爆発リスク(超高層物件特有の強風、通常風、微風、上昇風、下降風も検討)	○	②超高層向耐風試験 集合住宅共用廊下側設置特有の強風環境も想定し、様々な風速・風向条件を考慮した実機検証を実施
	不完全燃焼によるCOの排出・滞留による中毒リスク(超高層物件特有の強風、通常風、微風、上昇風、下降風も検討)	○	
	据置型ユニットの排気口接触による火傷リスク	○	上記①試験にて同時実施
	据置型ユニットからの高温排ガス吹き出しによる火傷リスク	○	
	給排気口閉塞(障害物、異物混入等)による不完全燃焼、可燃性ガス滞留による中毒/爆発リスク	○	③給排気閉塞試験 人為的もしくは偶発的な閉塞環境も考慮した実機検証を実施
パッケージ換気	(筐体内部漏洩など不具合時に)PS内へ可燃性ガスを含む換気ガスが滞留することによる火災/爆発リスク	×	実機試験は不要(現行の国内外の基準・標準・実務指針で対応可能)

(管体内部漏洩など不具合時に)PS内へCOを含む換気ガスが滞留することによる中毒リスク	×	
揮発性材料(殺虫剤等)の噴霧による腐食、爆発、不完全燃焼による中毒リスク	×	
換気口閉塞(障害物、異物混入等)による不完全燃焼、可燃性ガス滞留による中毒/爆発リスク	○	上記③試験にて同時実施

表Ⅲ2.2.1.4.2-2 ハザード分析検討結果(バルコニー側への設置)

ハザード項目	ハザード詳細	試験要否	実機試験の概要
周囲壁など	長時間運転に伴って温度上昇したバルコニー壁面や避難扉等への接触による火傷リスク	×	実機試験は不要(現行の国内外の基準・標準・実務指針で対応可能)
	昆虫、小動物等の侵入による誤作動リスク	×	実機試験は不要(現行の国内外の基準・標準・実務指針で対応可能)
	揮発性材料(殺虫剤等)の噴霧による腐食、誤作動リスク	×	
	地震による誤作動/転倒リスク	×	実機試験は不要(現行の国内外の基準・標準・実務指針で対応可能)
	エアコン室外機等の隣接電気製品との電氣的干渉(イミュニティ、エミッション)による誤作動リスク	×	
排気ガス(温度・組成)	不完全燃焼による可燃性ガスの排出・滞留による火災/爆発リスク(超高層物件特有の強風、通常風、微風、上昇風、下降風も検討)	○	② 超高層向耐風試験 集合住宅のバルコニー設置特有の強風環境も想定し、様々な風速・風向条件を考慮した実機検証を実施
	不完全燃焼によるCOの排出・滞留による中毒リスク(超高層物件特有の強風、通常風、微風、上昇風、下降風も検討)	○	
	据置型ユニットの排気口接触による火傷リスク	×	実機試験は不要(現行の国内外の基準・標準・実務指針で対応可能)
	据置型ユニットからの高温排ガス吹き出しによる火傷リスク	×	
	災害避難時における高温排ガス吹き出しによる火傷リスク	×	
		給排気口閉塞(正面風、上昇風、下降風、障害物、浸水、異物混入等)による不完全燃焼、可燃性ガス滞留による中毒/爆発リスク	○
排気還流	バルコニー壁との干渉(排気還流)による不完全燃焼(可燃性ガス滞留)による火災リスク	○	④ 排気還流試験 集合住宅のバルコニー特有の閉鎖環境や、バルコニー壁との離隔距離条件等を考慮した実機検証を実施
	バルコニー壁との干渉(排気還流)による不完全燃焼(COの排出・滞留)による中毒リスク	○	

2.2.1.4.3 供試体の調達

前項で選定した4試験を実施するため、集合住宅設置タイプの供試体として、発電ユニットと貯湯槽が別置き純水素PEFCシステム（分離型）、発電ユニットと貯湯槽が一体となった純水素PEFCシステム（一体型）及びSOFCシステムの3機種を選定した。選定した集合住宅設置タイプの供試体の概観を図Ⅲ2.2.1.4.3-1に示す。なお、また、PEFCシステムの評価も行うため、本事業で調達した戸建仕様のを1台選定した。



純水素PEFCシステム
（分離型）



純水素PEFCシステム
（一体型）



SOFCシステム

図Ⅲ2.2.1.4.3-1 集合住宅設置タイプ供試体の概観状況

2.2.1.4.4 集合住宅における安全要件及び設置基準等の検討

実機検証試験項目として選定した4試験について、国際標準や現行JIS規格等を参考に試験方法案を作成し、実機検証試験を通じ、集合住宅設置等における安全要件及び試験方法を検討するとともに、とりまとめた試験方法や安全要件及び設置基準案を国際標準(IEC)改定検討の場等へ提供した。

2.2.1.4.4.1 超高層向耐風試験

(1) 目的

超高層住宅（高さ60メートル以上）で想定される厳しい強風環境下においても、燃料電池システムが正常に起動（点火）し、また燃焼状態を維持し発電が継続できるかどうかを確認する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.4.4.1-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
送電端出力、オフガス燃焼部温度、改質器温度、セルスタック（温度）、オフガス燃焼部火炎、燃料ガス流量、電源電圧、排気口直後の排ガス温度、排ガスの成分ガス濃度（H ₂ 、O ₂ 、NO _x 、CO、THC、SO _x 、CO ₂ ）、周囲大気温度	<ul style="list-style-type: none"> ・CO濃度：0.14%以下（酸素ゼロ%換算値） ・水素を燃料とし、改質器を持たないものはH₂濃度：1%以下

②データ収集方法

1) 機器の状態及び試験環境

- a) 機器の状態：機器を、屋外設置式のものにあつては図Ⅲ2.2.1.4.4.1-1に示す試験装置に設置する。
- b) 電源：定格周波数で定格電圧の90%の電圧とする（点火試験時のみ）。
- c) 排ガス採取：供試体毎に、製造業者と協議し、データに影響与えることがなく確実に採取できる最適排ガス採取方法を採用する。

2) 点火試験

屋外設置式のものにあつては図Ⅲ2.2.1.4.4.1-1に示す4方向について、10 m/sの風を送った状態で、取扱説明書などに示す点火の方法によって点火操作を繰り返し、点火の回数及び爆発的に点火しないことを確認する。いずれの機器も腰壁の有無に対してそれぞれ試験を行う第1回目の点火については、停止状態において起動を行い、着火を確認し、運転を停止する。第2回目以降は、引き続きこの試験を実施する。点火試験の回数は3回以上とする。点火の確認は、燃焼検知手段、製造業者の示す方法などによる。

3) 燃焼試験

a) 着火の確認

屋外設置式のものにあつては図Ⅲ2.2.1.4.4.1-1に示す4方向について、10 m/sの風を送った状態で停止状態から起動する。このとき、起動開始から負荷が定格出力（最大燃料消費量による運転状態）到達後30分以上経過するまでの状態において、炉内（システム内全ての燃焼部を対象とする）に設置した燃焼検知手段などによって、安定した燃焼状態であることを確認する。いずれの機器も腰壁の有無に対してそれぞれ試験を行う。

b) 燃焼及び運転状態の確認

a) の定格出力到達後、30分以上経過した段階で、屋外設置式のものにあつては図Ⅲ2.2.1.4.4.1-1に示す4方向について、5 m/sの風を3分間及び30 m/sの風を1分間送る。このとき、それぞれの状態において、炉内に設置した燃焼検知手段などによって、消火及び逆火がなく安定した燃焼状態であることを確認する。いずれの機器も腰壁の有無に対してそれぞれ試験を行う。

c) 起動/運転状態の確認

a) 及び b) の全試験中において、警報又は異常停止・緊急停止が発生しないことを確認する。

(3) データ収集の実施

実施したケースの一部で点火シーケンスに進まないケースが見られたが、そうした場合でも全て通常の停止動作に移行しており、安全上問題となるケースは無かった。また正常に運転を継続した供試体では、点火・燃焼状態の把握が適切にできており、超高層向耐風試験方法の試験条件としては適切な範囲内である事が示唆される結果となった。

(4) 評価方法の検討

超高層住宅（高さ 60 メートル以上）で想定される必要な風速の検討にあたり、地表面からの高さとの関係について、考察を行った。

一般に地表付近の風速は、地表面の摩擦の影響で上空に比べて弱い。どの程度弱くなるかは大気安定度や地表の粗度によって異なるが、大まかには次式で表される「べき法則」に従うと言われている。

$$VZ = VR (Z / ZR)^{1/n}$$

ここで、VZ、VR はそれぞれ地上からの高さ Zm、基準の高さ ZRmにおける風速を表わす。これまでの観測結果から、地表面の状態と n との関係は表Ⅲ2.2.1.4.4.1-2 のようになる。

表Ⅲ2.2.1.4.4.1-2 地表面の状態と n との関係

地表面の状態	n
平野、草原	7
森林、高い建物のない市街地、住宅地	4
大都市の郊外周辺、市街地	3
大都市の中心付近	2

(自然科学研究機構 国立天文台編 理科年表オフィシャルサイトより)

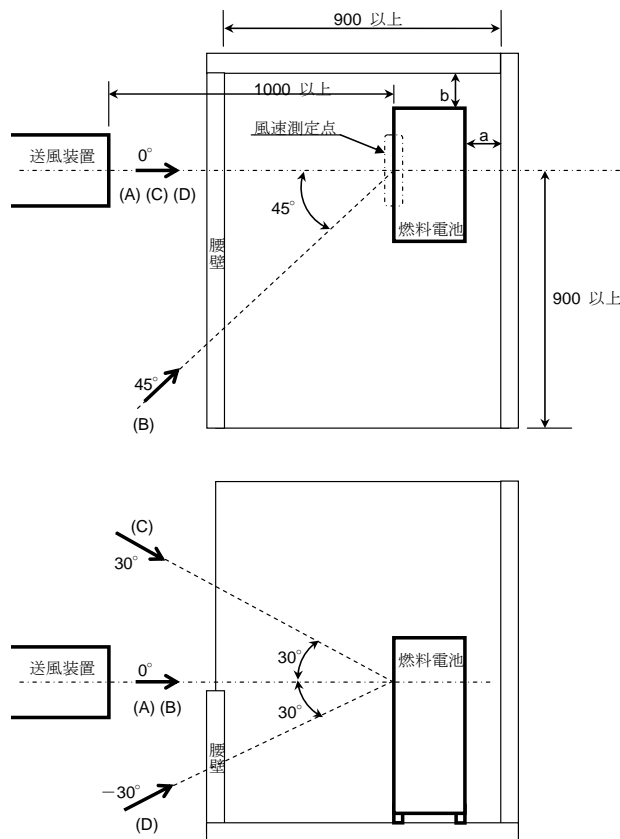
http://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/kisyo/kisyo_011.html

近年日本においても 200m を超える超高層マンションは存在するが、ここでは 60m～150m 程度の建築物で、建設場所の地表面の状態は「大都市の郊外周辺、市街地」と想定した。例えば基準の高さを地上 10m とし、そこでの風速が 15m/s であった場合、換算風速は 27m/s～37m/s となる。これは基準の高さとした地上 10m で風速 15m/s であった場合の 1.82 倍～2.47 倍となる。

そこで超高層住宅における耐風性能試験の風速については、一般的な耐風試験の 2 倍程度の風速にて実施することが望ましいと考えた。以上の考察から、耐風試験による風速条件を表Ⅲ2.2.1.4.4.1-3 の通り整理した。

表Ⅲ2.2.1.4.4.1-3 耐風試験による風速条件

	IEC	JIS	超高層向耐風試験方法
点火試験	4.4m/s	5m/s	10m/s
着火試験	—	5m/s	10m/s
燃焼試験	①	2.5m/s (3分)	5m/s (3分)
	②	15m/s (1分)	30m/s (1分)



図Ⅲ2. 2. 1. 4. 4. 1-1 屋外耐風試験装置 (バルコニー、PS 設置)

注記 1 a 及び b は、取扱説明書などによる最小指定寸法。

注記 2 風は、送風装置と機器の給気部及び排気部との距離を 1000 mm 隔離し、給気部及び排気部に一様に当てるものとする。ただし、送風装置の吹出し口と機器の給気部及び排気部との関係から、同時に当てられない場合は、排気部に当てるものとする。

注記 3 風の測定前の校正は、機器及び障害物がない状態において、送風装置の吹出し口の前方 1000 mm 以上の実際の位置で、送風装置側から見て、給気部及び排気部に外接する長方形の中心点を中央風速とし、長方形の各頂点を含む 5 点を測定する。ただし、開口部の下端が地面から 200 mm 未満のときは、地面から 200 mm の点を測定点とする。

注記 4 試験風速は、5 点の平均風速とし、各測定点の風速は、試験風速に対して ± 10% 以内とする。

2. 2. 1. 4. 4. 2 排気還流試験

(1) 試験方法検討の目的

燃料電池を設置し運転している際、壁などの影響を受け、排気口からの排気が再度、給気口より給気され、燃料電池の運転状態が不安定になり、危険な状態が継続しないかどうかを確認する。

(2) データ収集方法の検討

① データ収集項目

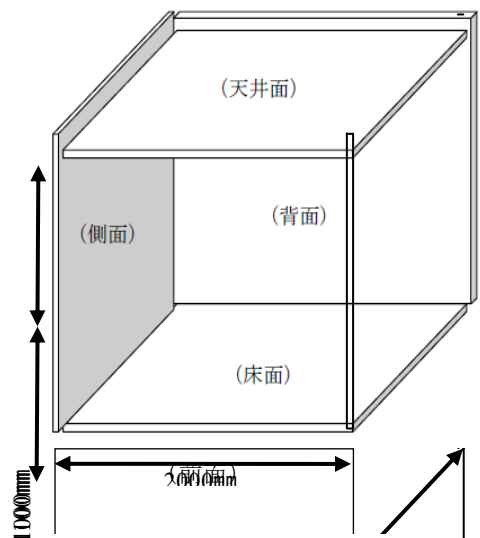
表Ⅲ2. 2. 1. 4. 4. 2-1 データ収集項目

主な測定項目	許容値など
送電端出力、オフガス燃焼部温度、改質器温度、セルスタック (温度)、オフガス燃焼部火炎、燃料ガス流量、電源電圧、排気口直後の排ガス温度、排ガスの成分ガス濃 (H ₂ 、O ₂ 、NO _x 、CO、THC、SO _x 、CO ₂)、給気口直後の給気ガス温度、給気ガスの成分濃度 (CO、CO ₂ 、THC、O ₂ 、NO _x 、SO _x 、H ₂)、周囲大気温度	給気ガスの濃度： ・ CO 濃度：0.14% 以下 (酸素ゼロ%換算値) ・ 水素を燃料とし、改質器を持たないものは H ₂ 濃度：1% 以下

②データ収集方法

1)測定機器の設置

- a) 燃料電池発電ユニットを、図Ⅲ2.2.1.4.4.2-1 に示す設置環境に製造業者が指定する要領で、製造業者の指定する距離となるように設置する。前面は床面より 1100 の高さとし、前面の横幅は 2000 、開口高さ 1000 とする。設置環境の奥行きは、燃料電池発電ユニットの排気口から前面までの距離を 2000 と 300 の 2 通りの設置状況で試験を実施する。製造業者の指定する距離が無い場合は、測定機器のパッケージを背面及び側面に防火上必要最小限の距離を確保して設置する。
- b) 燃料電池発電ユニットの給気・排気口周囲から、平均的に給気・排気ガスを採取できるよう、燃料電池発電ユニットの給気・排気口の形状に応じたガス採取器を取り付ける。排ガス採取器は、JIS S 2109 による。



図Ⅲ2.2.1.4.4.2-1
排気還流試験測定機器設

2)測定の方法

- a) 燃料電池発電ユニットを起動させ、バーナの点火有無を確認する。
- b) 定格発電時の定常時（目標負荷到達の 30 分後以降）において、給気及び排気ガス成分その他各測定項目の測定を 24 時間実施する。

(3) データ収集の実施

SOFC システム、純水素 PEFC システム、PEFC システム（改質型）のデータ収集結果では、排気還流の影響でシステムの運転状態が不安定になることはなかった。

(4) 評価方法の検討

国際標準や国内標準には排気還流試験の記載はないため、「ガス機器の設置基準及び実務指針」に記述されている、所定のインナーバルコニー設置環境において長時間運転を行い、給排気ガス成分の濃度変化を確認する試験として、新たに試験方法を検討した。

排ガス組成の測定だけでなく、給気ガス組成の測定も実施することとし、給気ガス CO 濃度（水素を燃料とし改質器を持たないものは H₂ 濃度）については、排ガスの許容濃度と同じとした。

測定機器の設置に関しては、「ガス機器の設置基準及び実務指針」を参考に、燃料電池発電ユニットの排気口から腰壁までの距離を 2000 とした場合と、腰壁までの距離が短い方が排気還流の影響を受けやすい可能性があること考慮し、最低限度のメンテナンススペースとして、腰壁までの距離を 300 とした場合の 2 種類とした。

2.2.1.4.4.3 給排気閉塞試験

(1) 目的

給気口もしくは排気口が、人為的もしくは偶発的に閉塞状態となったとき、燃料電池システムの運転状態が不安定になるなどして危険な状態が継続しないかどうかを確認する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

表Ⅲ2.2.1.4.4.1-1 の収集項目（オフガス燃焼部火炎は除く）に準じる。

②データ収集方法

1) 給気閉塞試験

- a) 定格発電時の定常時（目標負荷到達後 15 分以上かつ熱的平衡が達成されるまで）において、給気口並びに排気口をともに全開とした状態にて、15 分以上運転を行う。
- b) 給気口を徐々に閉塞させ、定格発電にて燃料電池発電ユニット内の各部温度、圧力等が安定して運転できる最大閉塞状態を決定する。この状態で、排ガス成分その他各測定項目の測定を 30 分間実施する。

2) 排気閉塞試験

- a) 定格発電時の定常時（目標負荷到達後 15 分以上かつ熱的平衡が達成されるまで）において、給気口並びに排気口をともに全開とした状態にて、15 分以上運転をおこなう。
- b) 排気口を徐々に閉塞させ、定格発電にて燃料電池発電ユニット内の各部温度、圧力等が安定して運転できる最大閉塞状態を決定する。この状態で、排ガス成分その他各測定項目の測定を 30 分間実施する。

(3) データ収集の実施

SOFC システム、純水素 PEFC システムのデータ収集結果では、給排気閉塞の影響で燃料電池システムの運転状態が不安定になるなどして危険な状態が継続することはなかった。

(4) 評価方法の検討

国際標準（IEC62282-3-1）では、給気閉塞試験については、①給気口を点火可能な最小開度から起動させる試験と②定格運転時に給気口を全開から徐々に閉塞させる試験の 2 種類を規定しているが、実試験での作業性等を踏まえ、②のみを実施することにした。さらに、排ガス CO 濃度の許容値については、他の試験同様 1400ppm 以下（水素を燃料とし改質器をもたないものは H₂ 濃度 1%以下）とした。

2.2.1.4.4.4 パイプシャフト温度上昇試験

(1) 目的

燃料電池システムは、ガス燃焼機器などと比べて長時間の連続運転をおこなうことが想定される。そこで、燃料電池システムからの輻射熱によりパイプシャフト（PS）内空間及び PS 内壁等の温度が異常に上昇しないかどうかを確認する。

(2) データ収集方法の検討

①データ収集項目

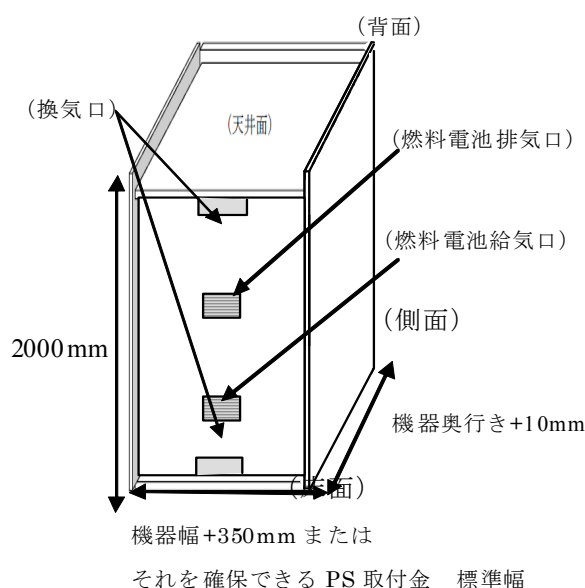
表Ⅲ2.2.1.4.4.4-1 データ収集項目（周囲木壁・空間内温度以外は参考データ）

主な測定項目	許容値など
送電端出力、操作時に手を触れる部分（起動・停止スイッチなど）、 、ガス閉止弁表面温度、パッケージ表面温度（天井面、背面、側面、前面及び床面）、セルスタック（温度・電流・電圧）、改質器温度、オフガス燃焼部温度、排気口直後の排ガス温度、周囲木壁温度（天井面、背面、側面、前面及び床面）、空間内温度、周囲大気温度	空間内温度： 燃料電池と同一空間内に設置される他設備（計量メーター等）に影響を与える温度としないこと

②データ収集方法

1)測定機器の設置

燃料電池発電ユニットを、図Ⅲ2.2.1.4.4.4-1 に示す測温板と燃料電池発電ユニットの離隔距離が、製造業者の指定する距離となるように、製造業者が指定する要領で設置する。製造業者の指定が無い場合は、天井面までの高さ 2000mm、幅は燃料電池発電ユニット幅+350mm またはそれが確保できる PS 取付金標準幅、奥行きは機器奥行き+10mm とし、燃料電池発電ユニットは片側に 1 台、メータを設置できる空間を確保して設置する。測温板の仕様は JIS S 2109 に従うこと。



図Ⅲ2.2.1.4.4.4-1 温度上昇試験の測温板配置

2)データ収集方法

表Ⅲ2.2.1.4.4.4-2 運転ケース及び測定方法

運転ケース	運転方法及び測定方法
1 正常運転 ケース	運転方法：冷起動→定格発電→通常停止操作→通常停止 測定方法： 起動操作10分前から測定を開始し、定格出力にて24時間以上運転した後、木壁面の温度が安定してから3時間維持する。その後、通常停止操作から各温度が低下するのを確認できるまで測定する。
2 異常運転 ケース (強制高温運 転)	運転方法：定格発電→異常運転（強制高温運転）操作→異常停止 測定方法： 定格出力にて24時間以上運転した後、木壁面の温度が安定してから30分経過後に異常運転操作を行う。データは異常運転操作10分前から、異常停止後各温度が低下するのを確認できるまで測定する。

(3) データ収集の実施

試験を行った供試体は、確認のため、PS を想定した閉空間内で長時間運転時の筐体表面温度等のデータも収集した。

(4) 評価方法の検討

供試体の配置については、片側に 2 台を配置することで、他設備を設置できる最低限の空間を確保できるようにした。

純水素 PEFC システム及び SOFC システムの正常運転ケース、異常運転ケース共に天井面空間内温度が最も上昇し、PS 内の上部に行くほど温度が高いという結果となった。そのため、他設備に影響を与える温度とまらないこととするほか、他設備の設置位置についても、なるべく低い位置にするなど考慮すれば、温度の影響を回避することが可能であるとの知見が得られた。

2.2.1.4.5 成果の活用

集合住宅に特有のハザードの整理・分析等を行い、実機検証が必要と判断した 4 項目について試験方法案を作成し、純水素 PEFC システムや SOFC システム等の多様な仕様の供試体を用いて集合住宅設置における安全要件及び設置基準等の検討に資するためのデータ収集を完了した。また、試験方法案に基づく実機試験を通して国際標準との整合化も見据えながら試験方法案の妥当性検証や加筆変更を進め、集合住宅設置等における安全要件及び安全評価試験方法について検討を完了した。表Ⅲ2.2.1.4.5-1 に検討結果を示す。

表Ⅲ2.2.1.4.5-1 集合住宅設置等における安全要件及び安全評価試験方法の検討結果

試験	安全要件	安全評価試験方法
超高層向耐風試験	JIS の 2 倍の風速である 10m/ の風を送った状態で点火し、30 m/ の風を送った状態で安定した燃焼状態であること。	耐風試験としては JIS、国際標準に記載があるが、超高層住宅の強風環境下は想定していないため、試験風速は JIS の 2 倍、風向条件は腰壁の有無を組み合わせた 8 ケースに条件分けした試験方法。
排気還流試験	所定のインナーバルコニー設置環境において、排気口から腰壁までの距離が 2000 と 300 の 2 条件で運転した場合、給排気ガスの CO 濃度が 1400ppm を超えないこと。	JIS、国際標準に排気還流試験の記載はないため、所定のインナーバルコニー設置環境において長時間運転を行い、給排気ガス成分の濃度変化を確認する新たな試験方法。
パイプシャフト温度上昇試験	所定のパイプシャフト設置環境において、パイプシャフト内の空間温度が、併設された他設備に影響を与える温度とならないこと。	JIS、国際標準にパイプシャフト温度上昇試験の記載はないため、所定のパイプシャフト設置環境において長時間運転を行い、パイプシャフト内空間温度変化を確認する新たな試験方法。
給排気閉塞試験	給気口もしくは排気口が運転し	国際標準には給排気閉塞試験の記

	得る最大閉塞状態での定格運転時に排ガスのCO濃度が1400ppmを超えないこと。	載はあるが、JISには記載はないため、国際標準をベースとした閉塞運転時の排ガス濃度変化を確認する試験方法。
--	--	---

また、これまでの検討結果や知見をもとに、国際標準への改善・新規提案内容を取りまとめ、2.2.1.5章に記載の定置用燃料電池の国際標準（IEC）改訂検討の場へ提供した。

国際標準（IEC62282-3-3）には集合住宅特有の設置環境を想定した規定がないことから、新規に集合住宅設置に関する章を追加することを検討するとともに、日本の国内設置基準「ガス機器の設置基準及び実務指針」で規定された内容の中から国際標準に提案すべき項目についても検討を行った。表Ⅲ2.2.1.4.5-2に、国内WG5（定置用燃料電池／設置要件）へ提案した検討案の一例を示す。

国内WG5での審議の結果、国内基準・標準にあるもので、提案すべきものは国際WGへ提案するが、集合住宅の設置要件のような国内基準・標準にないものは、まずは国内基準・標準への反映を優先し、その動向を踏まえて国際標準への展開を図るべきとの結論となった。そこで、国内基準・標準への反映に注力し、「日本電機工業会規格（JEM規格）」等への反映を目指した取り組みを進め、JEM規格の審議等を行う「燃料電池発電システム技術専門委員会」では、JEM規格化を進めていくことが承認され、現在JEM規格の策定中である。今後は、その動向を踏まえつつ国際標準化への展開を進めていくことになる。

表Ⅲ2.2.1.4.5-2 国際標準（IEC）への検討案の一例（国内WG5への提案内容）

提案項目	国際標準（IEC）の規定内容	検討案
超高層向耐風試験	集合住宅特有の強風環境を想定した規定がない。	建物の高層階など、地上に比べより強い風が想定される場所に燃料電池システムを設置する際は、強風への対応を特に考慮する規定を追加。
排気還流試験	集合住宅特有の狭小空間への設置を想定した規定がない。	アルコーブやインナーバルコニーに設置する際は、自然換気が十分行われるよう考慮する規定を追加。
パイプシャフト温度上昇試験	集合住宅特有の閉鎖的な空間への設置を想定した規定がない。	パイプシャフト等の閉鎖的な空間に設置する際は、温度上昇等による他設備への影響を考慮する規定を追加。
給排気閉塞試験	機器の給気口閉塞に対する注意 起はあるが、排気口に対してはなし。	排気口の閉塞に対する規定を追加。
防火上の離隔距離	排気口との防火上の離隔距離の規定がない。	排気口との離隔距離の規定を追加。
ドレン処理	ドレン処理の規定がない。	ドレン処理の適切な措置を追加。

一方、給排気閉塞試験については国際標準（IEC62282-3-1）に記載されている試験方法について、2.2.1.4.4.3の検討結果に基づく提案内容を取りまとめ、検討の場へ提供した。表Ⅲ2.2.1.4.5-3に、国内WG3（定置用燃料電池／安全性）へ提案した給排気閉塞試験の

検討案を示す。

表Ⅲ2.2.1.4.5-3 国際標準（IEC）への給排気閉塞試験検討案の一例
（国内WG3への提案内容）

提案項目	国際標準（IEC）の規定内容	検討案
給排気閉塞試験	＜排気閉塞試験 定格運転時の安定条件として15分と規定	「15分以上かつ熱的平衡が達成された時点」に修正
	＜給気閉塞試験 給気口を最小開度から起動させる試験と、全開状態から徐々に閉じる試験が規定	給気口を全開状態から徐々に閉じる1種類の試験に変更（排気閉塞試験と整合させる）

国内WG3での議論として、給気閉塞試験では給気口を全開状態から徐々に閉じる試験と、点火可能な最小開度から起動させる2種類の試験が規定されているが、両方の試験をする必要性はないとの意見等もあり、排気閉塞試験と整合をとり、給気閉塞試験も給気口を全開状態から徐々に閉じる1種類の試験に変更する内容で了承された。この内容は日本からの提案として、国際WGの場において審議される予定である。

2.2.1.5 国内外の基準及び標準化に関する情報の収集及び国内外の標準化活動の推進

2.2.1.5.1 概要

燃料電池は本格的な実用化が進みつつあり、先行して開発されたりん酸形燃料電池（PAFC システム）や熔融炭酸塩形燃料電池（MCFC システム）はすでに商用化され、業務用途用として販 売されている。また PEFC システムも家庭での電気と熱の需要に応えられるコージェネレーション用として商用化段階にあり、日本においては平成 20 年度末までに 3352 台の 1kW 級 PEFC システムが各地でフィールドテストされた後平成 21 年度からは家庭用燃料電池「エネファーム」の統一名称で 一般家庭向けに販 売が開始された SOFC システムも家庭用途用に開発が急ピッチで進められており 日本では出力 700W のコージェネ燃料電池が平成 21 年度末で 127 台 各地で実証試験に入っている

定置用燃料電池の商品化は 日本以外の各国においても活発に進められている 米国では PEFC システムが主に非常用電源や通信用電源として使われ始めている また インドの通信会社に 1 万台の通信施設用電源として輸出する 約を交わした 州では Callux Lighthouse Project の一環として SOFC システムを含め 800 セットの家庭用 PEFC システムを実証試験する計画がある 州は特に数 kW 規模の SOFC システムを実用化する動きが活発で 年間 1 万台規模で製造できる工場がドイツで建設中である アジアでは 国が Monitoring Project の中で平成 20 年までに 210 台の 1kW 級家庭用 PEFC システムの実証試験を実施している また平成 24 年までに 1 万台弱の実証試験を計画している

マイクロ燃料電池の分野では平成 21 年に日本で携帯電話充電用などの用途に直接メタノール形(DMFC)のモバイル燃料電池が本格的販 売を開始した 一方海外のメーカーでは米国 ドイツのベンチャー企業 10 社以上が開発にしのぎを削っており 最近では 国 台 中国などのアジアの企業が 米をしのぐ いで ノートパソコン用電源 野外 用電源などを対象に開発を進めている

このような各国間の実用化に向けての激しい競争の一方で 技術開発の国際協力の必要性も強く ばれ平成 15 年(2003 年)11 月水素経済のための国際パートナーシップ(IPHE: International Partnership for the Hydrogen Economy)が発足し 日本を含め 17 カ国が参加して国際的な活動を進めている

以上のように国際的な開発競争や技術協力が推進される状況において、燃料電池に関する国際標準を作る活動も活発化している 燃料電池発電システムの普及促進を図っていくためには、高信頼性化、コンパクト化、コスト低減等の技術開発の 力を続けて行くことは 論であるが、これと相まって、円滑な導入促進のための諸環境整備として、燃料電池発電システムに関する用 語の定義、安全性や性能に関する試験法、保守・保安に関する基準などの標準化が望まれている。しかも WTO/TBT 協定にあるように 国内の規格・規準は国際標準を基礎とすることが求められており 国際標準の位置づけは極めて重要になってきている。

そうした背景のもと、平成 17 年度から「水素社会構築共通基盤整備事業」において、規制再点検、標準化に反映されるデータ取得、試験方法の検討を JGA で実施してきた。そうしたデータや試験方法は JEMA に設けられている燃料電池国際標準化委員会などに提供され、それらのデータに基づいて国際規格案の審議を実施してきた。

燃料電池の国際標準化については、平成 10 年(1998 年)10 月に IEC (International

Electrotechnical Commission：国際電気標準会議）の中に燃料電池発電技術の標準化に関する TC105（Technical Committee 105：第 105 専門委員会）が設立され、活動が進められている。平成 22 年（2010 年）3 月現在では表 III 2.2.1.5.1-1 に示すように 11 の Working Group（以下、WG）が設置されている。

表 III 2.2.1.5.1-1 IEC/TC105/WG の分類

WG	内容	コンビーナ	WG	内容	コンビーナ
WG1	用	米国	WG7	ポータブル用FC	米国
WG2	FCモジュール	ドイツ	WG8	マイクロFC・安全	米国
WG3	定置用FC・安全要件	米国	WG9	マイクロFC・性能	日本
WG4	定置用FC・性能試験方法	日本	WG10	マイクロFC・互換性	日本 / 国
WG5	定置用FC・設置要件	ドイツ	WG11	PEFC単セル試験	日本
WG6	移動用FC・動力源	止中			

一方 国内では JEMA に IEC/TC105 に対応する国際標準化委員会およびそれぞれの国際 WG に対応した国内 WG（Japan Working Group）を設けて、国際標準の調査活動を進めるとともに国際標準に対する国内意見の集約 反映を行ってきた

2.2.1.5.2 IEC TC105 における活動

燃料電池の国際標準化活動は、平成 10 年（1998 年）10 月に IEC（International Electrotechnical Commission：国際電気標準会議）の中に燃料電池発電技術の標準化に関する TC105（Technical Committee 105：第 105 専門委員会）が設立され平成 17 年（2005 年）5 月より活動が開始された。IEC/TC105 の概要を表 III 2.2.1.5.2-1 に示す。

表 III 2.2.1.5.2-1 IEC/TC105 の概要（平成 22 年 3 月現在）

TC105	燃料電池技術
スコープ	定置用、移動体用、可 用（ポータブル）など全ての燃料電池の適用形態に係る国際標準を検討する。 りん酸形、固体高分子形など燃料電池の種別は区分せず、全てを対象とするよう める。
議長国	平成 10 年～平成 17 年 9 月：カナダ 平成 17 年 9 月～平成 23 年 8 月：日本
幹事国	ドイツ
参加国	カナダ、中国、チェコ、デンマーク、フィンランド、フランス、ドイツ、イスラエル、イタリア、日本、 国、オランダ、スペイン、イギリス、アメリカ（15 カ国）、オブザーバー 14 カ国
リエ ン（連携）	Internal IEC Liaison：TC 8, TC 31 Liaison ISO：ISO/TC 21, ISO/TC 22, ISO/TC 197 Liaison A：EC
国内審議団体	社団法人 日本電機工業会（JEMA）

平成 22 年 3 月現在の TC105 の WG（作業グループ）構成、及び各 WG の担当規格を図

Ⅲ2.2.1.5.2-1 に示す。全体で 11 の WG で構成され、りん酸形、固体高分子形など燃料電池 (FC) の種類による区分はなく、WG1：用語、WG2：FC モジュール、WG11：単セル試験法、WG3～WG10 は利用形態によって分類されている。定置用とマイクロ (携帯用) については 3 つの WG に分けて審議が進められており、また、WG6 (移動体用) については、ISO/TC22/SC21 (電動自動車) のもとで ISO/IEC の合同 WG として活動することが決定されているが、国際規格作成は時期尚早として現在 中止中である。日本は、TC105 の議長および WG4、WG9、WG10 および WG11 のコンビナを務めている。燃料電池の開発・実証で日本が世界の先頭を走っていることから、強い発言力となって国際標準に反映されている。

なお、マイクロ燃料電池は、日本の提案に基づいてポータブル燃料電池から独立したもので、その定義の区分としては、「出力 240W 以下かつ電圧 60V 以下で、人が容易に手で持ち運ぶことができるもの」をマイクロ燃料電池、それ以外の可搬型燃料電池をポータブル燃料電池として定義されている。



図Ⅲ2.2.1.5.2-1 IEC/TC105 の審議体制 (平成 22 年 3 月現在)

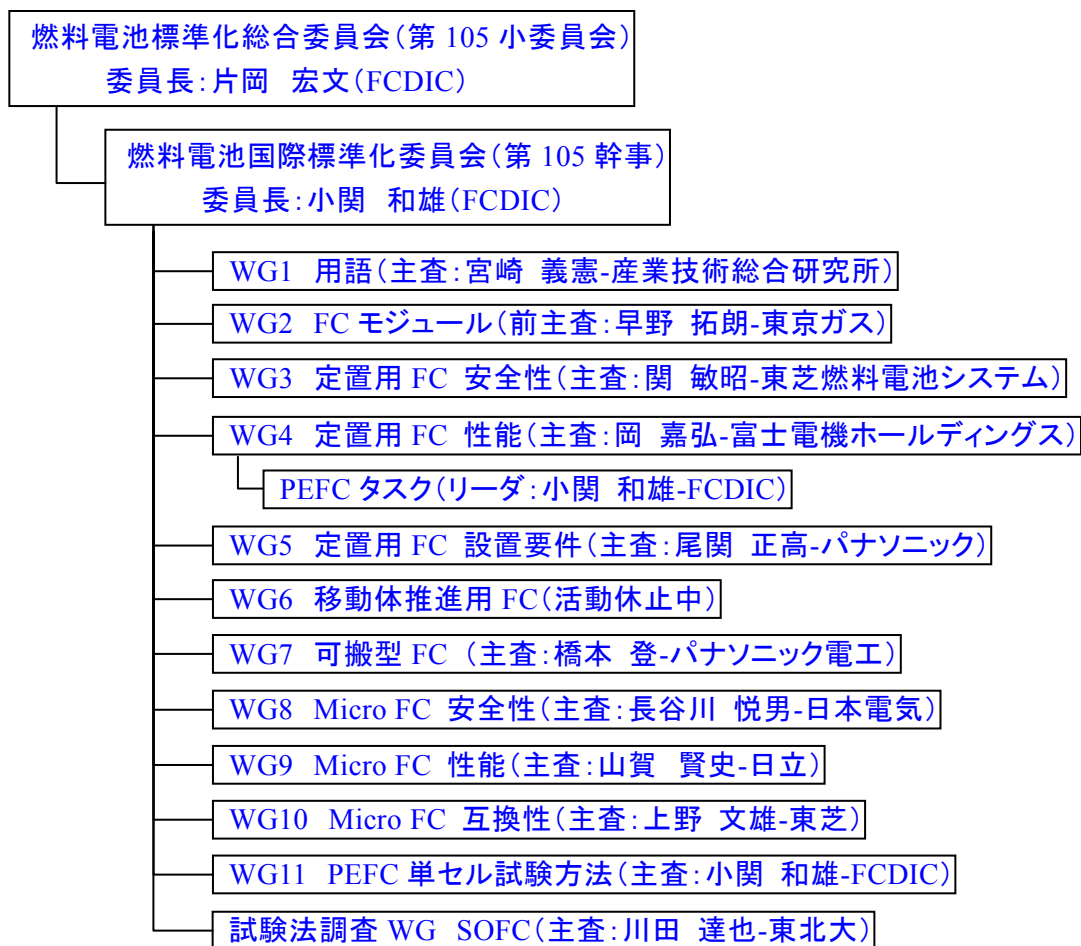
2.2.1.5.3 研究開発の実施体制

メーカー、ユーザ、関連団体および大学・研究機関等の学識経験者により編成される燃料電池標準化総合委員会を組織し、定置用・可搬型・マイクロ燃料電池に関して、独立行政法人 産業技術総合研究所（以下産総研と略称）との連携により、エンドユーザである消費者の安全性と利便性の確保のため、安全性評価試験ならびに性能試験方法の確立等を積極的に進め、これらの成果を国際標準ならびに国内への反映を図ることとする。

国際標準策定にあたり、我が国が主導権を取り、標準化活動を推進する体制とする。

国内外における燃料電池に関する法令・法規を調査・検討し、規制適正化に必要な試験方法・基盤データを産総研から得て、これら国内外の規制の適正化を図る。

以上の活動により、定置用・可搬型・マイクロ燃料電池の普及実用化の基盤整備を推進し、燃料電池の早期実用化に資する。研究開発の実施体制を図Ⅲ2.2.1.5.3-1 に示す。



図Ⅲ2.2.1.5.3-1 研究開発の実施体制

2.2.1.5.4 IEC TC105 全体会議の概要

全体会議は、1年半以内の期間毎に議長、セクレタリ、IEC 中央事務局の TC105 担当、各 WG のコンビナーが集まり、各 WG 及びリエゾン会議の報告や TC105 の活動方針に係る審議、各国のプレゼンテーション、が行われている。本事業期間の5年間の間に4回開催さ

れており、開催場所・/時期は、以下の通り。

第6回：平成17年12月 フランクフルト

－ 藤澤裕道（日立）が新しく TC105 議長に

第7回：平成18年10月 東京

－ 日本より「PEFCのシングルセル試験方法」について新規提案・採用

－ CEN/CENELEC より「燃料電池ガスヒーティング機器規格」を紹介

第8回：平成19年10月 パリ

－ WG6（移動体推進用FC）の活動方針検討の Ad hoc グループ立上げ

第9回：平成21年6月 ソウル

－ 藤澤前議長の IEC 会長への に伴い、WG10 コンビナーであった上野文雄（東芝）が TC105 の議長に 。WG10 の後 コンビナとして森 俊典（東洋製）が 。

－ 日本の新規提案「小形 PEFC 性能試験法の規格」の審議状況報告（WG4）

－ WG6/AHG1 の作業遅延対応のためセクレタリに柴田和男（JEMA）が ，活動スケジュールを決定。

－ 国より「マイクロ FC-デバイスとのデータ互換性」について新規提案紹介。

2.2.1.5.5 IEC TC105 各 WG の活動（成果と概要）

IEC/TC105 の下に設置された各 WG での規格文書の審議状況及び国内での対応状況の概要を表Ⅲ2.2.1.5.5-1 に示す。

表Ⅲ2.2.1.5.5-1 IEC TC105 各 WG の活動成果と概要（平成22年3月現在）

WG	項目	幹事国	進捗状況
WG1 JWG1	用	米国	<u>IEC TS62282-1</u> （第2版審議中） 日本から JIS C8800（燃料電池発電用）改訂案を提出（用数：200）2010年に第2版（TS）発行予定。
WG2 JWG2	モジュール	ドイツ	<u>IEC 62282-2</u> （第2版審議中） 2004年7月に燃料電池関係の最初の IEC 規格として発行。 2007年2月に部分改正版（Amendment）発行。 2009年6月から WG で第2版のための改定作業を開始。2010年に CDV 発行予定
WG3 JWG3	定置用・安全要件	米国	<u>IEC 62282-3-1</u> （第2版審議中） 2007年4月に <u>IEC62282-3-1</u> として第1版発行 2009年12月に 1stCD を回 。その結果で 2ndCD (105/280/CD) を審議中。 主な変更予定内容は、電気安全性、リーク試験、強度試験 日本から純水素形の安全要件を追加提案予定
WG4	定置用・	日本	IEC 62282-3-2（第2版審議中）

表Ⅲ2.2.1.5.5-1 IEC TC105 各 WG の活動成果と概要（平成 22 年 3 月現在）

WG	項目	幹事国	進捗状況
JWG4	性能試験法	橋本	2006 年 3 月に IS（国際規格）として第 1 版発行。 現在委員会投票用原案（105/281/CDV）を審議中。 主な改正点：ASME PTC50 との整合 規格番号：IEC 62282-3-200 に変更 IEC 62282-3-201（第 1 版審議中） 並行して小形 PEFC 性能試験法について日本からの新規提案が承認され、JIS をベースとしたドラフトを作成審議中
WG5 JWG5	定置用・設置要件	ドイツ	IEC 62282-3-3（第 2 版審議中） 2007 年 11 月に IS（国際規格）として第 1 版発行。 現在第 2 版の投票用委員会原案を作成中。 日本から、集合住宅向けの設置要件について追加提案の準備中であることを紹介済み。
WG7 JWG7	可型・安全要件	米国	IEC 62282-5-1 2007 年 2 月に安全要件についての国際規格第 1 版発行。第 2 版案を審議中。主な変更点は、 ①衝撃環境での使用を想定した要件の追加 ②バッテリーとの組み合わせを想定した要件の追加
WG8 JWG8	マイクロ FC 安全要件	米国	IEC 62282-6-100（2010 年 3 月第 1 版発行） 2006 年 2 月の PAS 発行から 4 年かけて審議が行われ、2010 年 3 月に IS（第 1 版）が発行された。 (1) ICAO（国際民間航空機関）の安全要求に対応 (2) IS（国際規格）の成立後、その補完作業を継続 (3) 発行された IS の分割化作業を開始
WG9 JWG9	マイクロ FC 性能試験法	日本 横山	IEC 62282-6-200（第 2 版審議中） 2007 年 11 月 マイクロ燃料電池初の国際規格発行 2010 年 2 月 第 2 版案審議中 規格発行後の新規提案事項など次期改定（2013 年）を目標として審議を開始
WG10 JWG10	マイクロ FC 互換性	日本 森 国 Cho	IEC 62282-6-300（第 2 版審議中） 2009 年 6 月:マイクロ燃料電池 2 番目の国際規格発行 2009 年 6 月以降:メタノール以外の燃料,新規カートリッジ,デバイス間の互換性などについて、次期改定（2012 年）を目標として審議を開始
WG11	単セル試	日本	IEC TS62282-7-1（第 1 版発行準備中）

表Ⅲ2.2.1.5.5-1 IEC TC105 各 WG の活動成果と概要（平成 22 年 3 月現在）

WG	項目	幹事国	進捗状況
JWG11	験方法	小関	日本から新規提案を行い、2007 年 3 月に NP が承認された。日本案をベースとしたドラフトを、各国からの要求を一部取り入れて修正し、TS として第 1 版を発行予定。引き続き「SOFC 単セル試験方法」について規格化提案（2010 年 12 月提案予定）を準備中。

2.2.1.5.6 国際間輸送対応

現在審議中のマイクロ燃料電池国際規格（IEC 62282-6-100）の前の IEC PAS62282-6-1（2006）は、ICAO 技術仕様書で引用され、規制緩和（燃料カートリッジの航空機内持込承認）に寄与した。

ICAO にて、現時点で考えられる全ての燃料カートリッジ（メタノール、ギ酸、ブタン、水素吸蔵合金、ボロハイドライド）の航空機内持込み規制が緩和された。（表Ⅲ2.2.1.5.6-1）

表Ⅲ2.2.1.5.6-1 燃料カートリッジの航空機内持込み規制緩和

マイクロ FC 燃料タイプ	燃料カートリッジ UN 番号	UN 危険物輸送 専門家小委員会	ICAO 危険物輸送パ ^ル （客室内持込）	国内航空法規（客室内持込）
メタノール	3473			
水素（吸蔵合金）	3479（3468）			
ギ酸	3477			
ボロハイドライド	3476			
ブタン	3478			

2.2.1.5.7 国際間輸送対応

【マイクロ燃料電池の市場化展開調査】

マイクロ FC の事業化展開のための問題点や規制のあり方など国際・国内市場の基盤整備に資することを目的に、各国の実態を調査し、台^湾、^日国、カナダについては現地調査を実施した。その結果、事業化展開にあたっての方向性をつかむことができた。詳細結果については、報告会を開催し、調査結果を関係者に紹介・提供した。

2.2.1.5.8 国内外の基準・標準調査と標準化活動の推進

本事業において燃料電池に係わる国際標準の作成を実施している。国内標準案の作成は別の事業で実施しており、事業間で連携し、内容的に^{衝突}が生じないように、情報交換を行

って活動した。

2.2.1.6 規制当局等の指摘に基づく燃料電池の安全性に関する検証・確認データの収集

10kW 未満の PEFC システム、SOFC システムを審議対象として、平成 17 年度から 18 年度まで「小規模燃料電池保安技術検討委員会（事務局：社団法人日本電気協会）」が開催され、電気事業法関連の規制適正化に関する審議が実施された。この中で、SOFC システムに特有の課題をふまえ、以下の 3 項目が安全性を検証するうえで追加検討すべき事項として取りまとめられた。

(1) システム内部及びパッケージ表面の温度に関する安全性試験

通常運転時及び異常発生時における、SOFC システムのパッケージ表面や内部の各部温度が異常に上昇しないかどうかを確認する。

(2) 排ガスの安全性試験

通常運転時及び異常発生時における、SOFC システムからの排ガスの温度や組成が、適切であるかどうかを確認する。

(3) 改質ガス漏洩時の安全性試験

SOFC システム内で CO を高濃度に含む改質ガスが配管から漏えいした場合に、システム外への CO 漏洩がないかどうかを確認する。

上記 3 項目の試験については、2.2.1.2.1.2.10～2.2.1.2.1.2.12 に既にそれぞれ記載のとおり、実機試験でのデータ収集を行って試験方法を確立した。

本試験データについては、2.2.1.2.1.4「成果の活用」で既に述べたように、当初予定の試験項目とともに小規模燃料電池保安技術検討委員会に提出し、平成 19 年 3 月 5 日開催の委員会において、規制適正化しても問題ないとの結論が得られた。

特許、口頭発表、投稿論文等の件数

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT*出願	査読付き	その他	
H17FY	0件	0件	0件	0件	3件	2件
H18FY	0件	0件	0件	0件	4件	9件
H19FY	0件	0件	0件	0件	4件	9件
H20FY	0件	0件	0件	1件	4件	10件
H21FY	0件	0件	0件	1件	7件	4件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

2.2.2 マイクロ燃料電池システム等に係る規制再点検及び標準化のための研究開発

2.2.2.1 メタノール燃料電池発電システムにおける安全性評価試験方法

2.2.2.1.1 研究の目的

メタノールを燃料とするタイプのマイクロ燃料電池(携帯用燃料電池)発電システムから排出される可能性のあるガス状の各種有機および無機成分中には生体に対して有害となりうるものがあり、当該燃料電池発電システムの使用にあたっては安全性確保の面でこれらの化学種の排出濃度が問題のない範囲内にあるか否かの確認が必要である。そのような化学種とは、メタノール、ホルムアルデヒド、一酸化炭素、二酸化炭素、ギ酸およびギ酸メチルである(表Ⅲ 2.2.2.1-1)が、許容濃度が非常に高くかつ測定も容易な二酸化炭素を除く他の5物質についてはこれまでにその測定方法についての検討を行い、実際に試作セルを用いた試験を行う等した結果、一定の考え方に基づいた上での測定方法としてはほぼ確立されていると考えられる。

ただし、その測定の際の考え方としては、排出試験を行う空間内では空気が十分に混合されており空間内のどこで測ってもガス濃度は同一であるとのモデル(完全混合モデル)に基づいていた。しかし現実には完全混合とみなせる条件がいつでも成り立っているとは限らないので、人体に非常に近い位置で使用されるマイクロ燃料電池の場合では人体近傍での排出ガス濃度は離れた位置で測定するよりも高濃度となっている可能性がある。そのようなマイクロ燃料電池の場合では上記のような人体近傍での局所効果(このような効果のことをここでは便宜上ローカルイフェクト(Local effect; LE)と称する)に対する考慮を別途設定すべきであるとの議論が平成22年3月に発行された国際規格(IEC 62282-6-100 Ed.1.0: INTERNATIONAL STANDARD: Fuel cell technologies –Part 6-100: Micro fuel cell power systems –Safety (マイクロ燃料電池発電システム–安全))の策定過程で提起された。しかし規格の速やかな発行が求められたためLEに対する十分な実験的データの集積が未了な中でLEに関する試験方法およびその判定基準が当該規格に盛り込まれた。

このため、メタノール燃料を用いるマイクロ燃料電池発電システムにおける安全性評価試験方法の排出特性に関する試験を実施することとした。ここでは、LEが無視できない場合のLEの大きさ評価に関し時間的濃度変動が激しい場合の計測対象ガス成分の分析計測方法についての検討を行う。それに基づいて基盤データを取得し、マイクロ燃料電池の安全性基準・標準案策定に活かすことを目指した。

表Ⅲ 2.2.2.1-1 IEC 62282-6-100 Ed.1.0 におけるマイクロ燃料電池からの排出成分の各許容限界値

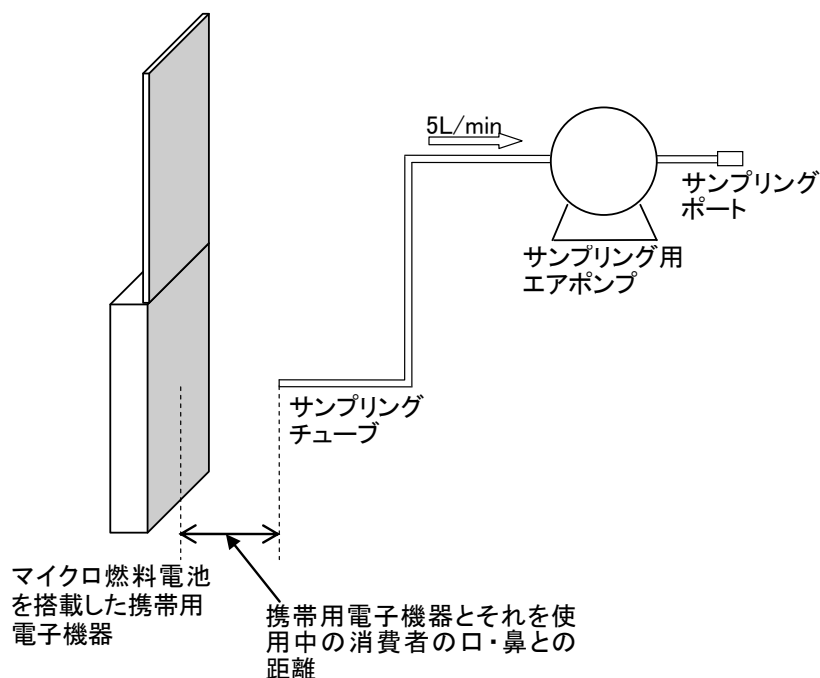
化合物名	濃度限界値 /g・m ⁻³	排出速度限界値 /g・h ⁻¹
メタノール	0.26	2.6
ホルムアルデヒド	0.0001	0.0006
一酸化炭素	0.029	0.29
二酸化炭素	9	60
ギ酸	0.009	0.09
ギ酸メチル	0.245	2.45

2.2.2.1.2 研究内容

従来からの経緯等

携帯電話機等顔のごく近傍で使用する機器用のマイクロ燃料電池では、排気ガスの排出源から至近距離において呼吸が行われることで排気中に含まれる化学物質に対する曝露リスクが高くなることが考えられ、これを適切に評価するための特別な測定方法および合否判定基準が国際規格IEC 62282-6-100 Ed.1.0に盛り込まれた。このような局所的な効果すなわちLEが無視できない場合のマイクロ燃料電池の排出特性の試験方法として、IEC 62282-6-100 Ed. 1.0では概略以下のように定めている(図III 2.2.2.1-1)。

- ・排出試験を「排出速度試験」と「排出濃度試験」の2種類に区別する。
- ・LEの無視できない機器では排出速度試験、排出濃度試験の両方とも実施する。
- ・排出濃度試験はチャンバーを用いず、大きくて障害物のない部屋(large open room)内で、静止雰囲気(still air)中で実施する。
- ・その部屋の換気は、通常の住居や商業用途建築設計に見合った最小値 (<1ACH (Air changes per hour; 時間当たりの換気回数))とする。
- ・外気の動きが部屋内の空気の静止を乱さないようにして測る。
- ・バックグラウンドによる影響を除くため、空試験の実施を推奨する。
- ・分析試料サンプリングの位置は機器と口・鼻との離隔距離相当とし、吸引速度は5 L/min とする。
- ・マネキンまたはモックアップを用いて試験の正確性を向上させてもよい。



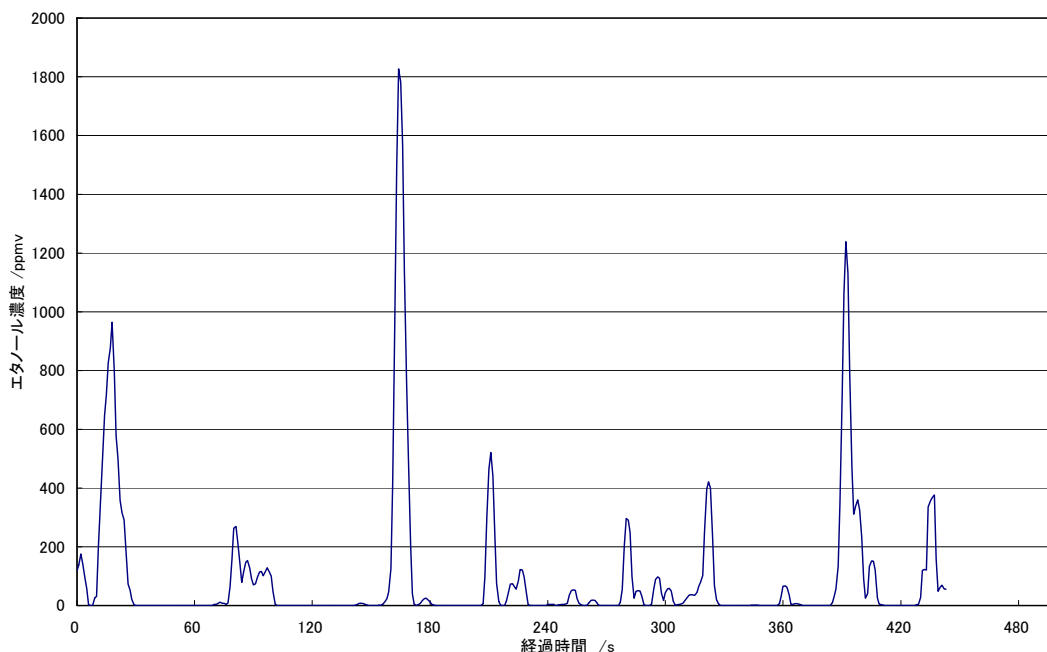
図III 2.2.2.1-1 IEC 62282-6-100 Ed.1.0の記載に基づいて構成したLEが無視できないマイクロ燃料電池に対する排出濃度試験の実施態様例

研究計画検討にあたっての背景

現状のIEC 62282-6-100 Ed.1.0にあるようなLE試験方法においては、観測される排ガス濃度の時間的変動が極めて激しいと考えられる。これは図Ⅲ 2.2.2.1-2に示した実験例から推察される。

このような時間的濃度変動の激しい排ガスを測定する際、ガスサンプリングバッグやキャニスター等の容器に排ガス含有空気試料を取り貯めた後ガス分析を行うことで所定時間内の平均濃度を求めることができる。しかし吸着性の強い物質では容器内壁への吸着が生ずるためこのような方法は適切でない。表Ⅲ 2.2.2.1-1中の化合物中ではギ酸がそれに該当すると思われる。ギ酸はホルムアルデヒドに次いで許容濃度基準値が低く(9 mg/m³ (=5 ppmv))かつこのような吸着性のため測定が難しい。そこで今回はギ酸ガスの測定方法に焦点を絞って検討することとした。

ホルムアルデヒドの場合のような国際的な公定測定法(ISO 16000-3)はギ酸の場合には定められていないが、米国の職業安全衛生局(Occupational Safety and Health Administration; OSHA)、国立職業安全衛生研究所(National Institute of Occupational Safety and Health; NIOSH)等の定める公定測定法では固体捕集剤への捕集→溶離液による溶離→イオンクロマトグラフによる測定という方法を採用している。このうちNIOSHではギ酸ガス濃度の測定方法としてMethod 2011(1994)においてシリカゲル捕集管を用いる方法を定めているが、シリカゲルは空気中に湿分が多い場合吸着能力が低下しやすいとされていることから、燃料電池からの排気の測定には好適でないと考えられる。一方、OSHAのMethod ID-186SG (1994)では活性炭捕集管を用いる方法を定めているが、同Method末尾に所載の



図Ⅲ 2.2.2.1-2 模擬排ガス(5000 ppmvエタノール含有空気)を模擬携帯電話機から500 mL/minで排出させたときの排出面の直上30 mm位置におけるエタノール濃度(90 %応答時間3 sのPID方式VOCモニターによる検出で測定)の時間変動例
(ただし、このモニターではガス種に対する選択性がないため、型式試験に必要となる実排ガス中に共存する各成分毎の定量分析には使用できない。あくまでも単独ガス(エタノール)の挙動をモデル的に追跡するために使用したものである。)

Table IIIのデータによれば、ギ酸の平均回収率は $0.5 \times \text{PEL}$ (Permissible exposure limit; 許容曝露限界) $\sim 2.0 \times \text{PEL}$ の範囲において120.7% \sim 92.6%とかなりの変動が見られている。これは捕集するギ酸ガス濃度によって回収率が変動するということであるが、定常濃度のギ酸ガスを測定する場合には予め種々の濃度で回収率を評価しておいてから実ガス測定を行えば活性炭捕集法でも真値に近い値を求めることができる。これに対し、濃度が時間的に変動している場合にはこのような方法は有効ではないだろう。従ってこのような固体捕集法により時間的濃度変動の激しいギ酸ガスを正確に定量分析することが可能であるか検証しておくことが必要である。また固体捕集法以外に、インピンジャー(ガス吸収瓶の一種)を用いた液体捕集法についても検討し、その定量特性を固体捕集法の場合と比較を試みることにした。

試験装置等

・イオンクロマトグラフ (IC)

ギ酸を捕集した活性炭捕集管から塩基性溶離液にて溶離されたギ酸イオン、またはインピンジャー内でギ酸を捕集した塩基性捕集液中のギ酸イオンの定量のため、オートサプレッサー方式イオンクロマトグラフを使用した。

・VOCモニター

濃度が短時間内に変動するギ酸の単独ガス発生系において、その濃度変化の様子をモニターする目的に使用した。このような時間的変動の激しいガス濃度をモニターするためにはガスクロマトグラフ等の通常のラボ用分析機器は不向きであり、PID (Photoionization detector; 光イオン化検出器)方式のVOC (Volatile organic compounds; 揮発性有機化合物)モニターを使用した。

・パーミューター

一定濃度のガスを連続的に発生させ、標準ガスとして供するために使用した。液だめの上部に一定内径の円筒が接続されたガラス製ディフュージョンチューブ内に調製したいガス(常温で液体であるもの: 今回はギ酸)の液体を入れこのチューブを一定温度に保持すると、液体から揮発拡散する速度は一定であるのでそこに希釈空気を一定流量流すことにより所要の低濃度標準ガスが連続的に調製できる装置である。

2.2.2.1.3 研究結果

■活性炭捕集管法およびインピンジャー捕集法を用いた定常濃度のギ酸ガスの測定

活性炭捕集管法およびインピンジャー捕集法それぞれにおいて、濃度変動がない定常濃度のギ酸ガスが精度よく測定できるかについて評価を行った。

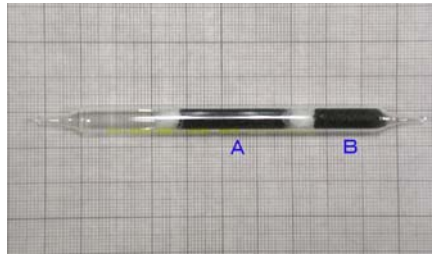
定常濃度ギ酸ガスの発生と捕集にはパーミューターによりギ酸ガスを一定濃度(5.16 ppmvまたは58.2 ppmv (注: 気中濃度の許容限界値は5 ppmv ($=9 \text{ mg/m}^3$)である)で連続発生しているラインからガス試料を200 mL/minで60 min活性炭捕集管またはインピンジャー内捕集液に捕集して行った。

・活性炭捕集管法による測定 メーカーの異なる2種類の活性炭捕集管(I)、(II)

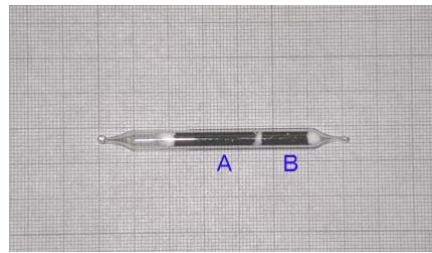
活性炭捕集管(I): SKC(米国), Cat.No. 226-09, Anasorb CSC, Lot No.2000, 20/40 Mesh, Section A:400 mg /Section B:200 mg

活性炭捕集管(II): ジーエルサイエンス, Cat.No. 3008-68111, 20/40 Mesh, Section A:100 mg/Section B:50 mg

を用いた(図III 2.2.2.1-3)。捕集後活性炭を取り出し1.5 mM 四ほう酸ナトリウム水溶液10 mLを加え10 min超音波照射してギ酸イオンを抽出しICにより測定した。



活性炭捕集管(I)



活性炭捕集管(II)

図Ⅲ 2.2.2.1-3 2種類の活性炭捕集管の外観(いずれも未使用時)

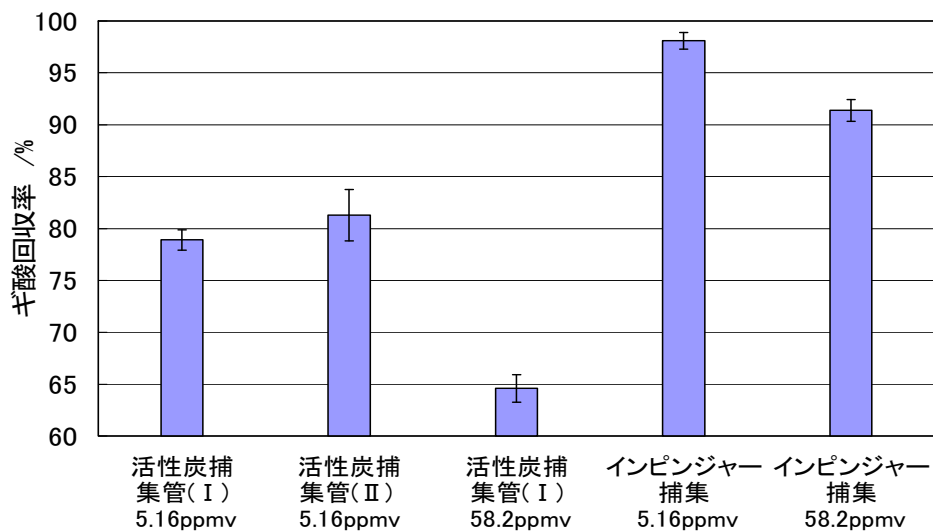


図Ⅲ 2.2.2.1-4 パーミエーターにより調製された定常濃度ギ酸ガスのインピンジャーによる捕集

・インピンジャー捕集法による測定：1.5 mM四ホウ酸ナトリウム水溶液30 mLを入れたミゼットインピンジャー2本を直列に接続して捕集し(図Ⅲ 2.2.2.1-4)、液中のギ酸イオンをICにより測定した。

各測定の結果、ギ酸の回収率は活性炭捕集管(I)、(II)ともに80%前後(5.16 ppmv時)となり、高濃度(58.2 ppmv)においてはさらに低下した(図Ⅲ 2.2.2.1-5)。定常濃度のガスを測定する場合は、定量値と回収率の関係を予め評価しておくことにより活性炭捕集管でのより正確な測定も可能と考えられるが、LEの場合は時間的に激しい濃度変動が生じていることから、活性炭捕集管法はあまり好適な方法ではないと思われた。

これに対し、インピンジャー捕集法では高濃度においても90%以上の回収率が得られた(図Ⅲ 2.2.2.1-5)。

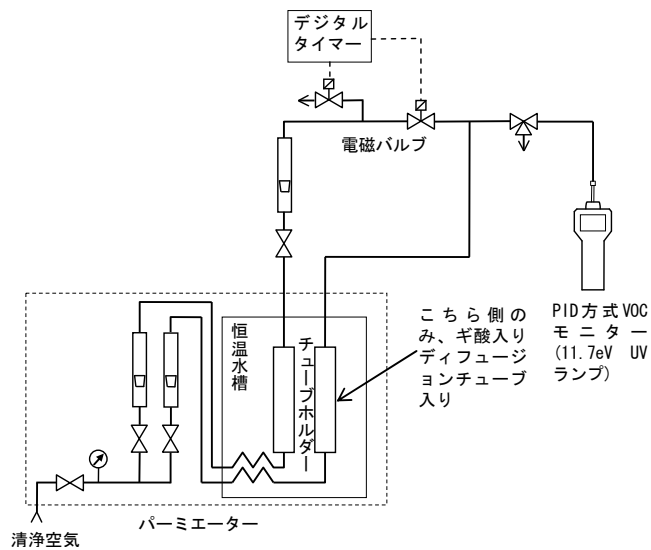


図Ⅲ 2.2.2.1-5 活性炭捕集管法およびインピンジャー捕集法を用いた定常濃度ギ酸ガス測定結果

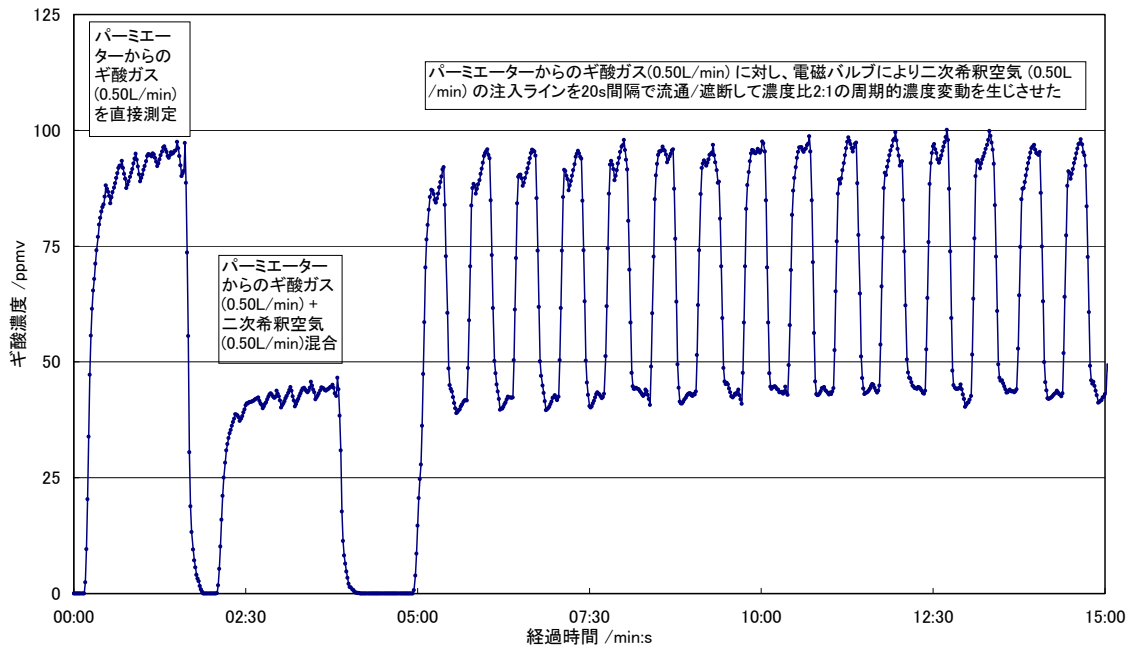
■ギ酸ガス濃度が周期的時間変動している系における活性炭捕集管法、インピンジャー捕集法による測定

LE試験時に想定されるようなギ酸ガス濃度が激しく変動する系(今回一例として、ガス濃度が10:1で20s間隔にて周期的に変動する系とした)を構成し、それに対して各捕集法を適用しギ酸ガス測定特性の比較を試みた。

パーミエーターによりギ酸ガスを一定濃度で連続発生させているラインに間欠的に希釈用空気を送り込み、濃度に規則的な時間的な変化(ガス濃度10:1(58.2 ppmv:5.82 ppmv)で20s間隔にて周期的に変動)を付与した。その際、デジタルタイマーおよび電磁バルブを用いて希釈空気の送り込み時間(閉止20s, 流通20s)をコントロールした(図Ⅲ 2.2.2.1-6)。



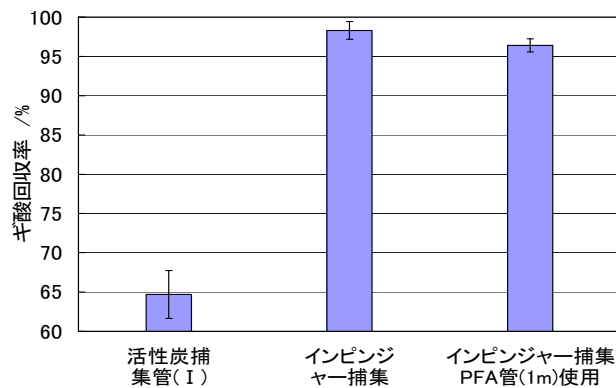
図Ⅲ 2.2.2.1-6 濃度が周期的に時間変動するギ酸ガス発生系



図Ⅲ 2. 2. 2. 1-7 パーミエーターと電磁バルブシステムを用いた周期的濃度変動を有するギ酸ガス発生

PID方式VOCモニターによる測定の結果、ギ酸ガス濃度にはほぼ設計通りの周期的濃度変動を生じさせることができた(図Ⅲ 2. 2. 2. 1-7)。

この周期的ギ酸ガス濃度変動系に対し、活性炭捕集管法を適用した場合のギ酸回収率の平均値は64.7%で、かなり低い値となった。これに対し、インピンジャー吸収法測定においては回収率の平均値98.3%の測定ができた(図Ⅲ 2. 2. 2. 1-8)。一方、インピンジャーは実体的にかなりかさばるため、LE試験への適用を考えた場合測定ポイント直近に設置すると気流を妨害する懸念がある。このため、インピンジャーを離して設置するため長さ1.0 mの6 mmφのPFA製吸引チューブにて測定ラインを延長した場合、回収率等への影響は殆ど見られなかった(図Ⅲ 2. 2. 2. 1-8)。



図Ⅲ 2. 2. 2. 1-8 ギ酸ガス濃度が58.2 ppmvと5.82 ppmvとの間で20 s間隔で周期的濃度変動する系に対する活性炭捕集管法、インピンジャー捕集法によるギ酸測定時の回収率

以上の結果と、活性炭捕集法による結果を比較した場合、回収率の面や測定の際のばらつきの面からLE測定時にはインピンジャー吸収法を適用した方がより好ましい測定特性を得られると考えられる。

2.2.2.1.4 まとめ

メタノール燃料電池発電システムにおける安全性評価試験方法の排出特性に関する試験を実施し、ローカルイフェクト(LE)が存在する場合のLEの大きさ評価のため、時間的濃度変動が激しい場合の計測対象ガス成分の分析計測方法について検討を行った。これは、現状のLE試験方法では、観測される排ガス濃度の時間的変動が極めて激しいと考えられるためである。このような変動の激しいガス濃度を測定する際、各種公定測定法にあるような固体捕集法で正確な定量分析が可能であるか検証した。分析対象成分の中でホルムアルデヒドに次いで許容濃度基準値が低く(9 mg/m³ (=5 ppmv))かつ強い吸着性のため計測が難しいギ酸の計測方法に焦点を絞って検討した。

ギ酸ガス濃度についてはホルムアルデヒドの場合のような国際的な公定測定法は定められていないが、米国における公定測定法(OSHA, NIOSH等)は固体捕集剤への捕集→溶離液による溶離→イオンクロマトグラフ(IC)による測定法を採用している。固体捕集法による測定においてギ酸ガス濃度の激しい変動がある場合、回収率が低濃度側と高濃度側で差があると分析精度に影響が出る可能性が考えられる。このような場合でも定常濃度のギ酸ガスを測定する場合では予め回収率を評価しておいてから実ガス測定を行えば固体捕集法でも真値に近い値を求めることができようが、濃度が時間的に変動している場合ではこのような方法は有効ではないだろう。

本研究の結果、活性炭捕集管法を用いたギ酸イオンのIC測定による回収率はギ酸ガス濃度5.16 ppmv時で80%前後となり、同58.2 ppmv時にはさらに低下した。またLEがある場合の試験を模擬した、ギ酸ガス濃度が58.2 ppmv⇔5.82 ppmvで20 s毎に周期的に変動する系に対して活性炭捕集管法を用いたギ酸イオンのIC測定での回収率は64.7%と低い値であった。

これに対し、固体からの溶離操作を伴わない液体捕集法であるインピンジャー捕集法についても検討した。ギ酸イオンのIC測定での回収率はギ酸ガスが高濃度(58.2 ppmv)時においても90%以上の回収率が得られた。また、ギ酸ガス濃度が58.2 ppmv⇔5.82 ppmvで20 s毎に周期的に変動する系に対してインピンジャー捕集法を用いたギ酸イオンのIC測定での回収率は98.3%であった。さらに、LE測定の観点からインピンジャー自体の体積が大きいため測定ポイントの直近に設置すると気流を乱して測定結果に影響を与えるかもしれないという懸念に対しては、今回の結果から少なくとも1 mは隔離して設置できるという見通しが得られた。

以上の結果、LEを考慮する場合のギ酸ガスの排出試験に際しては活性炭捕集管法よりインピンジャー捕集法の方がより好適であるとの示唆が得られ、今後見込まれるIEC 62282-6-100改定作業に向けた指針が得られた。

2.2.2.2 メタノール燃料電池発電システムにおける性能評価試験方法

2.2.2.2.1 研究の目的

本項目では、マイクロ燃料電池（携帯用燃料電池）の普及時において、燃料電池に悪影響を及ぼして消費者やメーカーが不利益を被るような粗悪な燃料・燃料カートリッジが出現する事態を未然に防ぎ、燃料基準の必要性等を検討し、標準化に資することを目的に、燃料不純物のダイレクトメタノール燃料電池（DMFC）に対する発電影響を検証する性能評価試験方法の検討と基盤データ取得を行うことを目的とする。

社団法人日本電機工業会と密接な連携により、マイクロ燃料電池の国際標準化活動に参画し、安全性及び性能評価法作成及びそのための実データ取得のための研究を行ってきた。その中で、International Electrotechnical Commission/ Technical Committee 105/ Working Group 10（IEC/TC105/WG10、マイクロ燃料電池 互換性）及び関連する分科会において、DMFCの燃料基準のための試験法作成や燃料不純物に対する指標の検討に参画し、単セルによる性能評価法検討のための運転研究および燃料不純物の運転性能への影響度を把握するための実データ取得などを行ってきた。これらの一連の活動は、未検証部分を残しながらも、最終国際規格案（FDIS）作成に寄与した。平成21年度は、FDISに対する投票が行われ国際規格の成立の可否が問われることになるが、燃料試験方法を含む燃料品質基準案の検証が課題であるので、これに取り組んだ。

燃料基準を検討するに当たり、燃料不純物については、流通段階を含む燃料由来の不純物やカートリッジからのコンタミネーションが想定されるが、燃料電池の発電性能に対して、どれほどの影響を与えるものかについては、よく知られておらず実験によって調べる必要がある。そこで、実際に影響を調べるに当たり、流通段階を含む燃料由来の不純物について可能性のある物質を想定して、これまで数時間レベルの単発試験によって燃料電池の性能挙動を調べるとともに実データを取得してきた。一方で、不純物を導入しない場合に繰り返し数時間レベルの断続運転試験を実施すると、運転中に電圧が低下しても次の運転再開時にはほぼ前回の電圧に復帰し、長期に亘り性能が変わることもわかってきたので、単発試験で、無機イオン、酸の効果を調べるとともに、有機化合物としてエタノール、無機イオンとして $\text{Na}^+(\text{NaCl})$ については、断続運転における燃料電池発電性能に対する影響も調べてきた。^{1)~4)}

無機化合物の燃料不純物候補例として $\text{Na}^+(\text{NaCl})$ を選択してその効果を調べたところ、断続運転により部分的な性能回復が見られること、繰り返し長期断続運転試験においては性能低下の蓄積が起こることを示すとともに、運転継続に伴う加速的な性能低下がみられるために、長期的性能を評価する場合には、各断続運転開始時値に基づく評価と運転開始後の定時値に基づく評価とでは、長期性能評価に違いが生じる可能性のあることがわかった。^{2),3)} これに基づく議論や試験データ再現性の議論などにより、国際標準ドラフトにおいては、運転開始後 4 時間値を取得することが定められた。いくつかの無機酸の影響も調べ、試験結果例を示すとともに、無機化合物の影響評価試験において不純物原料物質に原子吸光用試薬を用いた報告例などでは大過剰の酸の影響を考慮しなければならない場合もあることを示した。

燃料カートリッジからのコンタミネーションの検討においては、不純物を特定しにくいことに加えて、各メーカーが燃料カートリッジを開発中であり、その開発を阻害しないよう、燃料基準の策定においては燃料電池の発電試験に基づく燃料評価試験法が検討されてきた。そこで、比較的長時間の断続運転により影響評価をすること、試験燃料と不純物を入れないリファレンス燃料による運転性能を比較対照することが必要になったため、単セルを用いた断続リファレンス運転を定電流モードで実施し、試験方法検討のための基盤データを取得してきた。

DMFCでは、不純物を加えないリファレンス燃料においても、6～8時間程度の定電流モードにおける運転で数%の性能低下が起こり、その後も徐々に性能低下していくが、断続運転とすることで性能回復すること、断続運転を繰り返すことによる性能低下の蓄積は少ないことを示した。^{2,3)}

IEC/TC105/WG10でのドラフト審議が進むにつれて、燃料カートリッジからの燃料基準を検討するに当たり、長期にわたる運転試験データが必要となった。さらに、リファレンス燃料による長期運転試験結果も要求され、その試験結果に対しても試験成立のための制限が加えられるようになってきた。これまで、短期的な運転試験においては、リファレンスとして、燃料不純物を混ぜていない燃料による運転を実施するなど、試験開始時に発電性能を確認してきたが、当該事業におけるリファレンス燃料における長期断続運転試験結果からは、試験法そのものについても検討を加える必要があると考えられた。

これまで数時間レベルの定電流モード運転に基づき、ほぼ1日1回の室温から70℃までの温度サイクルと起動停止を含む断続運転を実施し、3セルで約400～500時間経過後に性能低下率数%レベル、ばらつき数ポイント程度の実データを得て、数百時間レベルでの断続運転試験における再現性と信頼性を取得できる見通しを得たが、²⁾ドラフト審議においてはさらなる長時間データや再現性、信頼性などについての議論があり、平成21年度は、さらに断続運転試験を継続し、検討することとした。

これまでに有機化合物としての不純物候補であるエタノールについて性能挙動に与える影響を調べたところ、運転初期に性能低下度の大きいこと、濃度約10ppm～1000ppmの範囲における電圧低下度は、濃度の対数におよそ比例すること、運転中にセル電圧が低下しても運転を断続させた場合に性能回復が起こり、燃料中の不純物濃度が一定であれば、繰り返し断続運転を行うことによる性能低下の蓄積効果はほとんど見られないことなどがわかった。^{2,3)}さらに、燃料不純物としてのエタノールについて定電流モード運転中の性能低下挙動を調べるため電気化学インピーダンス法を適用したところ、セル内の反応サイトへの障害が起こることが示唆された。⁴⁾平成21年度は、カソードを水素極として運転することにより、アノードとカソードに与える影響を調べることにした。

FDISでは、いくつか例示された指標があるが、未だにこれら不純物がどのくらい影響するかを示す公開された運転データが整っているわけではなく未検証であるため、例示している低分子有機化合物について、基盤データを取得し影響評価することとした。

文献等)

- 1) 西村靖雄, 松山恵, 石井みどり, 太田智宏, 山根昌隆, 柳田昌宏, 永井功, 宮崎義憲, 第14回燃料電池シンポジウム講演予稿集, 262, 2007.
- 2) 西村靖雄, 松山恵, 山根昌隆, 柳田昌宏, 永井功, 宮崎義憲, 第15回燃料電池シンポジウム講演予稿集, 111, 2008.
- 3) Y. NISHIMURA, M. MATSUYAMA, I. NAGAI, M. YAMANE, M. YANAGIDA, Y. MIYAZAKI, *ECS Trans.*, 17, 511, 2009.
- 4) 西村靖雄, 松山恵, 山根昌隆, 柳田昌宏, 永井功, 宮崎義憲, 第16回燃料電池シンポジウム講演予稿集, 243, 2009.

2.2.2.2.2 試験方法等

燃料不純物評価セルの主な仕様

アノード : Pt 1mg/cm² + Ru (Pt:Ru=1:1)/C、カソード : Pt 1mg/cm²/C

イオン交換膜 : Nafion 117、電極面積 : 10 cm²

燃料 : 1 M メタノール (MeOH) 水溶液

燃料調製用メタノール : JIS 特級同等以上品

超純水 : 比抵抗値 18 MΩcm 以上

試験方法 : 燃料電池の不純物影響発電試験には、運転モードは定電流発電モードとし、電流密度は 150 mA/cm²、運転温度は 70 °C とした。各物質の燃料電池性能に対する影響度比較の方法はいくつか考えられ、燃料循環システム運転においては不純物が濃縮されての影響度の加速的効果なども考えられるが、まずは燃料ストイキオメトリーや不純物濃度が一定条件での比較検討を行うこととして、燃料は再循環しない流通式で試験した。試験条件で上記の共通的なもの以外については、各項目の試験結果とともに記載する。

2.2.2.3 試験結果

2.2.2.3.1 レファレンス燃料断続運転における燃料濃度および流速の影響

これまで IEC/TC105/WG10 においては、燃料試験法条件の燃料濃度と流速についてはごく一般的な条件であろうとされて、あらわに実データを基にした議論は為されなかった。そのため、それらの燃料電池運転性能に与える影響について検討を加えた。国際規格では、セル面積を約 10cm²、燃料濃度を 1 mol/L (M) とし、燃料流速 1 mL/min を推奨している。燃料濃度 1 M 流速 1 mL/min (1 M-1 mL/min) での運転性能とともに条件を変えた試験結果を比較し結果例を図 III 2.2.2.2-1 に示す。燃料濃度 1 M で燃料流速を 1 mL/min、1.5 mL/min とした場合の性能は、6 時間程度の運転時間においてはさほど違いが生じず、挙動も安定していた。流速 0.3 mL/min とした場合は、初期性能はあまり変わらないものの、時間経過とともに性能にゆらぎが生じて、挙動が不安定になりつつ、運転時間 3 時間以降はセル電圧の低下が顕著になった。長期運転の場合には、流速の影響が徐々に効いてくることが示唆された。1/3 M - 3 mL/min とした場合、約 20 mV 性能が向上するとともに安定な挙動を示した。これは、メタノールクロスオーバーの影響が小さくなったことや燃料の局所的な不足が起こりにくくなったためと考えられた。同濃度で 1.5 mL/min の場合には、約 1 時間で 30mV 程の性能低下がみられ、セル電圧の揺らぎが大きくなり、不安定となった。2 M - 1 mL/min とした場合には、約 20mV 強の性能低下が生じたが挙動は安定していた。メタノールクロスオーバーの影響が大きくなるものの燃料の局所的な不足が生じにくかったためと考えられた。これらの結果より、数時間レベルの性能評価であれば、現条件で十分であるかもしれないが、長期的な安定性を考慮するとさらなる検討が必要であると示唆された。

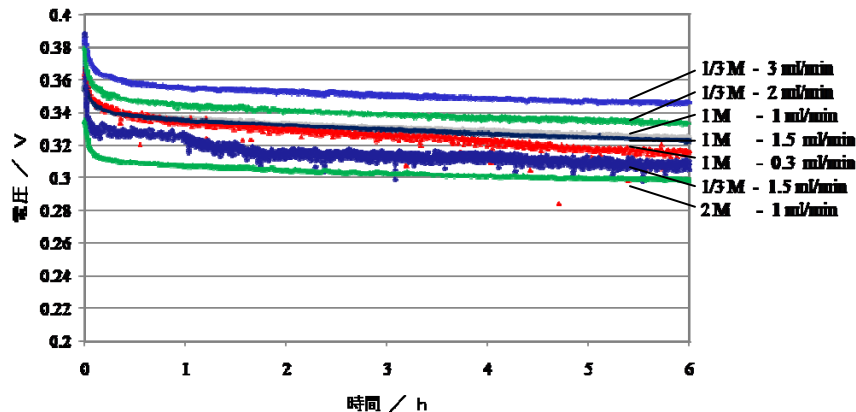


図 III 2.2.2.2-1 レファレンス燃料断続運転における燃料濃度と流速の影響

2.2.2.2.3.2 長期断続リファレンス運転試験

燃料不純物の影響を初期評価およびスクリーニングするための試験としては、従前は比較的短時間での電流－電圧特性や数十分レベルの定電流モードでの運転評価試験を計画していたが、IEC/TC105/WG10 での議論を経るにつれ、燃料基準検討において不純物成分すべてを特定することが難しいことから、燃料カートリッジから取り出された燃料の適否を判定するために、1日あたり数時間レベルでの断続運転を繰り返しての数百～1千時間の長期にわたる運転試験が必要とされる意見や燃料電池セル寿命を1万時間と推定する意見が出された。燃料合否判定試験には、並行してレファレンス燃料による運転試験も義務付ける意見も出され、その性能如何によって試験成立かどうか問われるようになり、試験そのものについても成立性の検討と検証が必要となった。

長期断続リファレンス運転試験では、起動停止を含む約6～8時間程度の繰り返し断続運転を実施し、複数のセルを用いて、それぞれに約2000時間のデータを積み上げた。図 III 2.2.2.2-2 に試験の経過を、各断続運転における開始時値、1時間値、2時間値など定時値で代表させデータを示した。なお、試験途中における温度等条件の異なる試験のデータは省略した。

各回の断続運転において数時間で約20～30mV（数%）の電圧低下を示したが、次回の運転再開時に性能はほぼ復帰していた。

長期に亘る性能の挙動については4時間値で示すと、運転初期数十時間は除いて、約100～300時間程度までは約20mV/1000h、その後約400～700時間までは約120～200mV/1000hで電圧が降下したが、その後に電圧降下は見られなくなり、約800～1300時間までは約50mV/1000hで上昇していった。約2000時間での試験時間に対する電圧降下度(4時間値)は、約20～40mV/1000h（約5～10%/1000h）であった。

数百時間経過した際の性能の揺らぎなど多少の検討課題は残るが、現行の国際規格における基準である性能低下率10%/500hの水準を上回る性能が得られた。また、IEC/TC105/WG10でのドラフト作成時に意見である、性能低下率10%/1000h以内とする燃料不純物試験案についても基本的に実施可能性の見通しが得られたと考えられる。

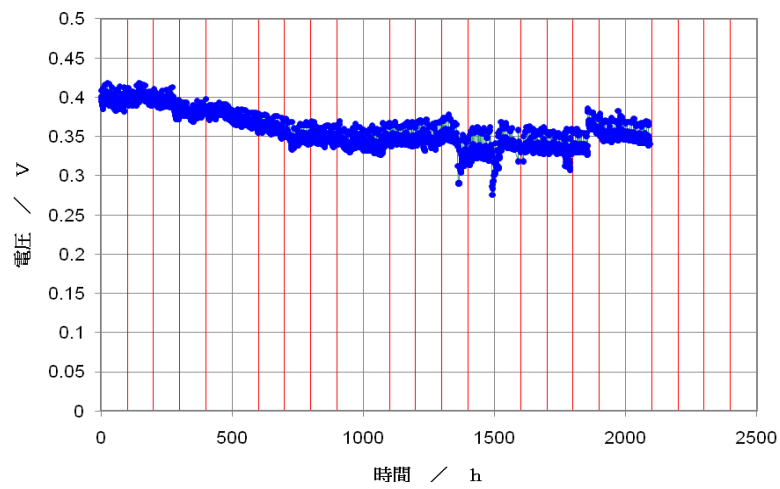
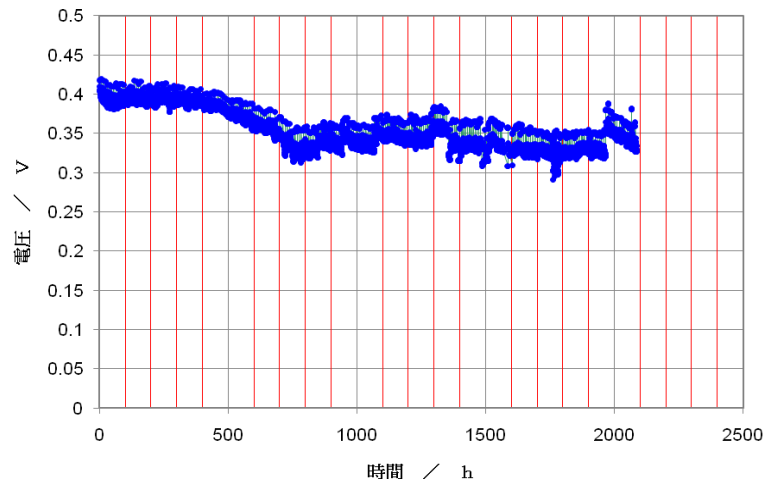
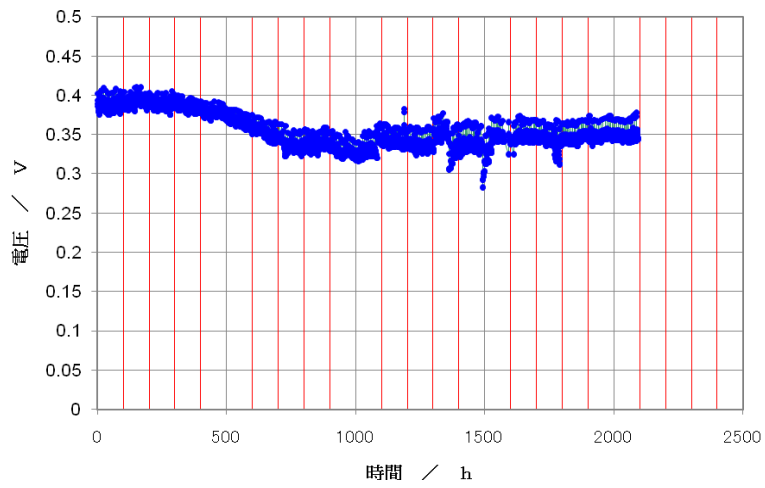


図 III 2.2.2.2-2 レファレンス燃料長期断続運転試験結果例

2.2.2.2.3.3 断続運転における不純物影響調査(低濃度エタノール)

従前の議論に基づいてエタノールの影響調査してきた濃度領域は、10 ppm ~ 1000 ppm であったが、FDIS における 1 M メタノール水溶液に対する許容濃度は、数 ppm レベルであるため、さらに低濃度領域まで拡張して実データ取得を行った。レファレンス燃料 (0 ppm) による断続運転 7 回において性能が安定化することを確認した後、0.1 ppm については、0 ppm の運転開始から 1 時間後に実施してから計 4 回、1 ppm において、3 回試験した結果を図 III 2.2.2.2-3 に示した。約 100 ppm 以下の濃度領域におけるセル電圧降下度は、およそエタノール濃度の平方根に比例することが分かった。

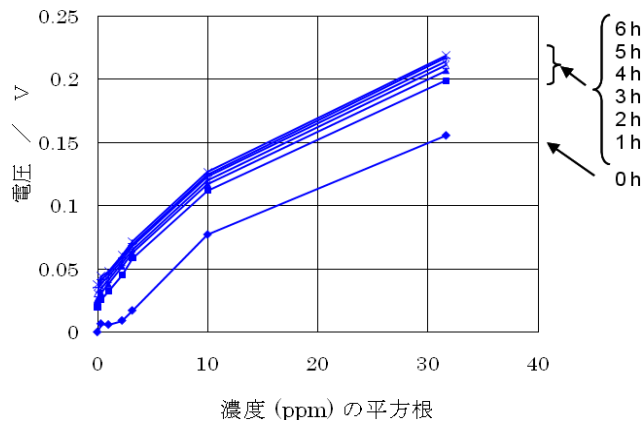
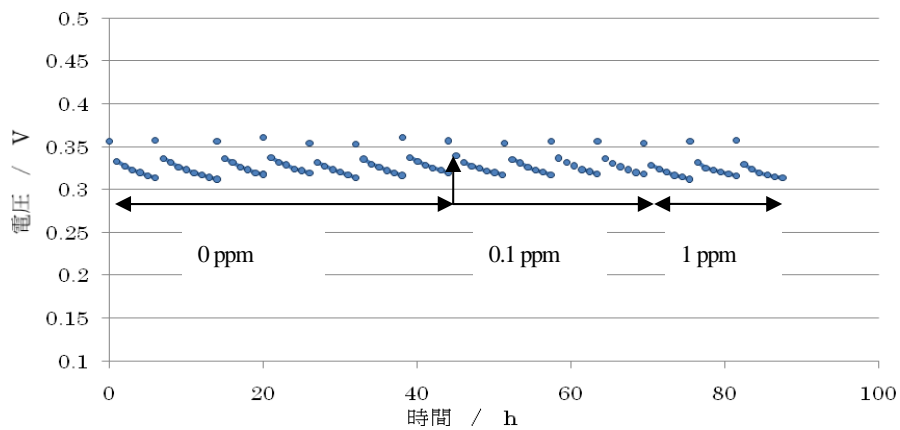


図 III 2.2.2.2-3 DMFC 断続運転性能に対するエタノールの影響

上図は、セル性能の経時変化を示す。各プロットは、各断続運転における開始時値、1、2、3、4、5、6時間値を示す。下図は、不純物エタノール濃度の平方根とセル電圧降下度との関係を示す。

2.2.2.2.3.4 断続運転によるC₂、C₃有機化合物の影響評価

これまで、有機化合物としてはエタノールなどを候補例として選択し、断続運転等において燃料電池発電性能に対する影響を調べ、運転時に性能が低下するものの、不純物濃度が一定の場合には次回運転開始時にほぼ性能が回復することなどわかってきた。また不純物エタノール濃度を 2×10^2 mol/L (1000ppm に相当)まで変えて試験したところ、いずれの濃度の場合も、運転開始直後に急速に電圧降下が起こるが、その後は、電圧降下は緩やかになり、不純物を入れていない場合の電圧降下の挙動に近づいていく傾向があることや、濃度約 $2 \times 10^4 \sim 2 \times 10^2$ mol/L 程度の範囲での電圧降下度は、およそ濃度の対数に比例する傾向があることなど報告した。また、無機イオン、酸、それらの混合物などいくつかの物質についての影響を調べてきた。

FDIS では、いくつかの低分子有機化合物について指標 IV として 10000 未満と与えられており、H~K まで3つにグループ分けして次のように例示されている。

$$IV = 100 \times (6 \times H + 38 \times J + 8 \times K) / Y$$

Y: メタノール濃度 (重量%)

H: エタノール、アセトアルデヒド、酢酸 の合計 (μ mol/L)

J: 1-プロパノールとプロピオン酸 の合計 (μ mol/L)

K: 2-プロパノールとアセトン の合計 (μ mol/L)

この指標が DMFC への運転性能への影響度を反映しているとすれば、許容値の大きい H グループの物質の影響度は最も低く、次に K グループ、J グループへと高くなるように考えられる。一方で、指標は設定されたものの、未だにこれら不純物がどのくらい影響するかを示す公開された運転データが整っているわけではない。ここでは、国際規格において例示されている7種の低分子有機化合物について、影響調査を試みた。

各物質の燃料電池性能に対する影響度比較の方法はいくつか考えられ、燃料循環システム運転においては不純物が濃縮されての影響度の加速的効果なども考えられるが、まずは燃料ストイキオメトリーや不純物濃度が一定条件での比較検討を行うこととして、燃料は再循環しない流通式で試験した。不純物濃度については、一定濃度での比較検討から始めることとして規格における基準よりも多少高い値であるが 2×10^3 mol/L とした。

燃料に不純物を入れていない場合と不純物低分子有機化合物を含む場合のセル性能を図 III 2.2.2.2-4 に示す。

これら低分子有機化合物が燃料不純物として含まれていた場合、運転開始直後から不純物に応じて発電特性に差が生じた。2-プロパノールとアセトンの電圧降下度は数 mV で同程度であった。また酢酸とプロピオン酸は 50~60mV、エタノール、アセトアルデヒドは約 80mV でそれぞれほぼ同程度の電圧降下度を示した。1-プロパノールは約 110mV であった。その序列を国際規格 IEC62282-6-300 Ed.1.0 の指標 IV における分類とともにまとめると、K (2-プロパノール≒アセトン) < H (酢酸) ≒ J (プロピオン酸) < H (エタノール≒アセトアルデヒド) < J (1-プロパノール) であった。

定電流運転を続けていくと、初期の1時間程度での電圧降下度が大きく、その後の降下速度は低下する傾向を示した。いずれの場合もさらに電圧が低下していく傾向が見られたが、それぞれの燃料不純物による電圧降下度は多少異なり、不純物の無い場合との電圧差については、酢酸を除いて大きくなる傾向を示した。さらに、長時間運転した場合を想定すると、それぞれの化合物の影響度の序列に入れ替わりなどが起こりうる可能性も示唆された。そこで国際規格における燃料試験法にならって、運転開始後4時間値で代表させて性能比較を行うと、電圧降下度については、2-プロパ

ノールに対して約 20 mV、1-プロパノールで約 150 mV などと算出され、不純物のある場合と不純物の無い場合の電圧降下度の差について、2-プロパノールの場合を基準に比率を求めると、アセトンはほぼ同程度、酢酸は約 2.5 倍、プロピオン酸は約 3.5 倍、エタノールは約 4 倍強、アセトアルデヒドは 4 倍強、1-プロパノールは 7 倍強であり、その序列を整理すると、K (2-プロパノール≒アセトン) < H (酢酸) < J (プロピオン酸) < H (エタノール≒アセトアルデヒド) < J (1-プロパノール) となった。

今回の試験はあくまで一つの例であり、データ数の少ないことや、国際規格に掲げられている基準値とは異なる濃度での比較試験であることなどから、その取扱いには注意を要するが、仮に低濃度領域においても、これらの低分子有機化合物の影響度の序列が変わらないとするならば、エタノール、アセトアルデヒド、酢酸に対する許容値と、アセトン、2-プロパノールに対する許容値の比には、多少変わる余地が残されると示唆された。また、酢酸に対する許容値については、エタノール、アセトアルデヒドと同じグループとして扱うのではなく、分けて考えても良いかもしれないことなども示唆された。

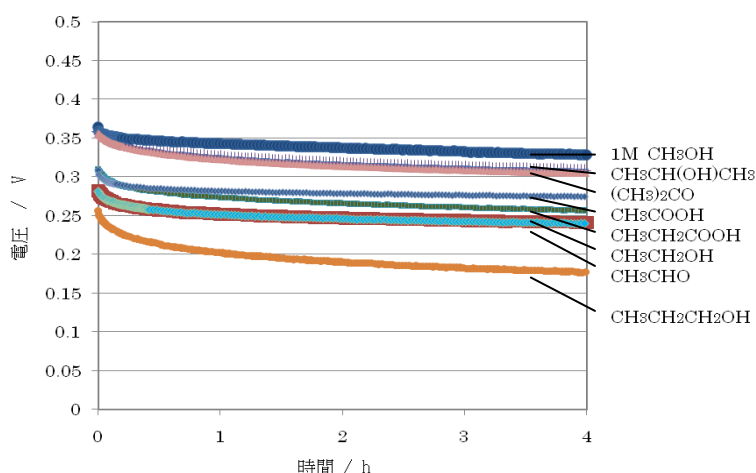


図 III 2.2.2.2-4 低分子有機化合物の DMFC 運転に対する影響試験結果例

2.2.2.3.5 断続運転中の電気化学インピーダンスによる不純物影響調査(エタノール)

燃料不純物がセル内にどのように影響するかを調べるために、電気化学的インピーダンス測定を適用した。燃料の不純物エタノール濃度を 1000ppm まで変化させて調べてきたが、本年度は、カソード側に水素を流して同様の測定を行い、アノードとカソードのスペクトルを得た。測定については、DMFC の定電流モードによる運転において、電圧降下が緩やかになった時点で、電気化学的インピーダンス測定を行った。

測定されたセルインピーダンススペクトルの Cole - Cole プロットを図 III 2.2.2.2-5 (左図) に示す。インピーダンススペクトルは、吸着中間体が反応に関与していることを示唆する容量性の円弧と誘導性の円弧が観測された。燃料中の不純物エタノールの濃度が高くなった場合、容量性の円弧の高周波数側の部分にはほとんど変化が見られないものの、容量性の円弧の低周波数側の部分と誘導性の円弧の部分が大きくなった。高周波数側で最初に実軸を切る切片には、エタノールの濃度依存性はあまり認められなかった。高周波数側から次に実軸を切る切片と、低周波数側で実軸を切る切片 (もしくは近づく点) については、エタノール濃度が大きくなるにつれて、大きくなっていくことがわかった。

アノード側のインピーダンススペクトルの Cole - Cole プロットを図 III 2.2.2.2-5 (右図) に示す。アノード側のインピーダンススペクトルでは、セルインピーダンスに比較して、誘導性の円弧がより明瞭に観察された。この場合も、以下に示すような挙動を示した。燃料中の不純物エタノールの濃度が高くなった場合、容量性の円弧の高周波数側の部分にはほとんど変化が見られないものの、容量性の円弧の低周波数側の部分と誘導性の円弧の部分が大きくなった。高周波数側で最初に実軸を切る切片には、エタノールの濃度依存性はあまり認められなかった。高周波数側から次に実軸を切る切片と、低周波数側で実軸を切る切片（もしくは近づく点）については、エタノール濃度が大きくなるにつれて、大きくなっていくことがわかった。このアノードのスペクトルの挙動は、セルインピーダンスの挙動の大半を説明すると考えられた。

カソード側のインピーダンススペクトルを図 III 2.2.2.2-5 (右図) に示す。カソード側におけるインピーダンスは、通常の DMF C 運転モードのセルインピーダンスとカソード側に水素を導入した運転モードとの差によって求めることができると仮定した。主として容量性円弧が観測され、エタノールの濃度の増大により弧の大きさが大きくなっていった。この変化については、エタノールやその反応生成物がクロスオーバーしてカソード側にも影響していたことを示唆すると考えられた。

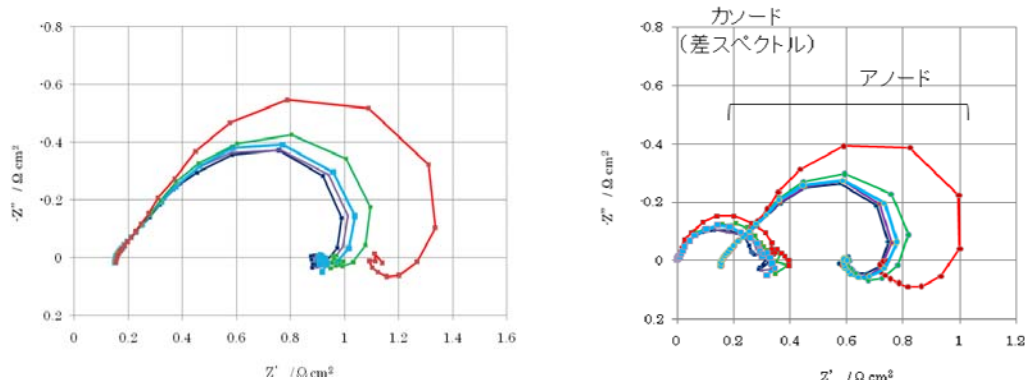


図 III 2.2.2.2-5 DMF C 運転中のセルインピーダンスにおけるエタノールの影響

それぞれのスペクトルにおいて弧の小さい方から、エタノール濃度 0, 1, 10, 100, 1000 ppm のデータを示す。

2.2.2.2.3.6 メタノール燃料電池発電システムの燃料不純物特性評価試験法の検討会

本事業においては、燃料不純物特性評価等については「メタノール燃料電池発電システムの燃料不純物特性評価試験法の検討会（委員長：梅田実 長岡技術科学大学教授）」を設置し、外部有識者の協力および助言を得つつ推進した。システムを想定した燃料循環による不純物・生成物等の濃縮、他物質も含めて系統的に影響を検討するためのメカニズムの研究、運転モードの影響の検討、加速試験、酸化剤の試験法に与える影響を調べることなどが今後の取り組むべき課題として抽出された。以下に開催日時、場所、委員名簿を示す。

第 1 回 開催日：平成 21 年 10 月 20 日

場所：産業技術総合研究所

第 2 回 開催日：平成 22 年 2 月 5 日

場所：産業技術総合研究所

メタノール燃料電池発電システムの燃料不純物特性評価試験法の検討会 名簿
(燃料不純物特性検討会)

(敬称略)

<u>委員</u>	<u>所属</u>
梅田 実	長岡技術科学大学 物質・材料系
柴田 和男	社団法人日本電機工業会 新エネルギー部
富岡 秀徳	財団法人日本自動車研究所 FC・EV研究部 標準化グループ
安達 修平	ヤマハ発動機株式会社 技術本部 研究開発統括部 システム研究部
加納 正史	積水化学工業株式会社 R&Dセンター 開発推進センター NEグループ
谷口 貢	三菱ガス化学株式会社 新潟研究所
<u>オブザーバ</u>	
大山 敦智	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 燃料電池・水素技術開発部
菅原 早奈子	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 燃料電池・水素技術開発部
<u>事務局</u>	独立行政法人産業技術総合研究所 ユビキタスエネルギー研究部門 マイクロ燃料電池連携研究体

2.2.2.2.4 まとめ

これまで、IEC/TC105/WG10、日本電機工業会と連携し、国際標準化に向けた活動を行ってきた。平成21年度にFDISに対する投票が行われ国際規格の成立の可否が問われることになったが、燃料試験方法を含む燃料品質基準案の検証が課題であったため、以下のように実施した。

メタノール燃料電池発電システムにおける性能評価試験方法の燃料不純物特性に関する燃料評価試験方法について基盤データを取得しつつ検討を行い、レファレンス燃料により安定動作可能となる基本的評価手法の実施可能性の見通しを得た。エタノール、アセトアルデヒド、酢酸等の低分子有機化合物の燃料不純物特性についての基盤データを取得ならびに評価し、メタノールを燃料とするマイクロ燃料電池システム等の国内外燃料品質基準・標準案策定（今後の改定作業）に備えた検討および基盤データ整備を行った。

なお、これまでの一連の活動は、国際規格（IEC 62282-6-300 Ed.1.0: INTERNATIONAL STANDARD: Fuel cell technologies –Part 6-300: Micro fuel cell power systems – Fuel cartridge interchangeability, 2009）の平成21年6月発行に寄与した。

本項目の推進にあたり、メタノール燃料電池発電システムの燃料不純物特性評価試験法の検討会（燃料不純物特性検討会）を設置し、長岡技術科学大学、日本電機工業会、日本自動車研究所、ヤマハ、積水化学、三菱ガス化学(敬称略)の協力を得て、燃料不純物特性評価等について検討を行った。国際規格の検証、システムを想定した燃料循環による不純物・生成物等の濃縮、他物質も含めて系統的に影響を検討するためのメカニズムの研究、運転モードの影響の検討、加速試験、酸化剤の試験法に与える影響などを調べることなどが今後の取り組むべき課題として抽出された。

特許、口頭発表、投稿論文等の件数

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表 (プレス発表等)
	国内	外国	PCT [※] 出願	査読付き	その他	
H21FY	0件	0件	0件	0件	5件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

2.3 研究開発項目C「水素インフラに係る規制再点検及び標準化のための研究開発」

2.3.1 水素インフラに関する安全技術研究

(1) 水素スタンドに係る安全性評価と安全対策検討(石油産業活性化センター)

- ① 70MPa 充てん対応水素スタンドについて、P&ID を作成することによりその設備仕様を定義し、検討のベースとなる水素スタンドモデルとした。水素スタンドモデルでは、燃料電池自動車普及期に必要となるであろう水素供給能力を持つ水素スタンドとした。
- ② 設備構成としても各種のバリエーションを考慮し、新規建設スタンドを想定した 80MPa 蓄圧器による差圧充てん方式の「新設モデル」とともに、既設 35MPa 充てん対応スタンドからの改造を視野に入れた「改造モデル」(40MPa 蓄圧器と 80MPa 蓄圧器による差圧充てん方式及び 40MPa 蓄圧器をガス源とした圧縮機直充てん方式) 及び 70MPa 充てんに必要なプレクール設備を備えた水素スタンドモデルとした。
- ③ これらの水素スタンドモデルに対して、発生が想定される事故シナリオの抽出を HAZOP、FMEA 手法を活用して行った。想定事故シナリオ抽出にあたっては、ヒューマンファクター、天災、外乱などを含め、可能な限り網羅的な抽出を心がけた。抽出した想定事故シナリオ 1 件ごとに、その発生可能性と影響度を評価しリスクの大きさを推定した。
- ④ 可能性評価にあたっては、連名委託先・再委託先である (株) 日本製鋼所、(株) タツノ・メカトロニクス、(社) 日本産業・医療ガス協会、住金機工 (株)、高压昭和ボンベ (株) の検討結果を活用した。
- ⑤ 影響度評価にあたっては連名委託先である三菱重工 (株) の検討結果を活用した。(6) 推定した個々のリスクは、予め判断基準として作成したリスクマトリクスに照らして評価し、リスクが許容できない場合はリスクを低減する安全対策を検討した。これにより、水素スタンドにおいて安全性を確保するために必要な安全対策の特定を行った。

(2) 水素スタンドを想定した水素の拡散・着火・爆発の挙動確認と安全性評価(三菱重工業)

35MPa 充てん対応水素スタンド及び 70MPa 充てん対応水素スタンド規制見直しに関連し、以下の成果を得た。

- ① 新規安全対策(過流防止弁、圧力リリーフ弁)の有効性検討のための実験及び CFD によるデータ取得
 - ・ 35MPa 及び 70MPa 充てん対応の過流防止弁について作動確認試験を実施し、当初の所定流量範囲での正常な作動を確認し、過流防止弁を設置することで、爆風圧を低減可能
 - ・ また、過流防止弁に関しては、配管内の残留水素量(配管長さ)と着火タイミングの影響も把握
 - ・ 35MPa 充てん対応については圧力リリーフ弁の圧損計測により、当初目論見通りの機能を発揮することを確認
- ② 蓄圧器室等の地下室化検討のための CFD によるデータ取得
 - ・ 40MPa での 0.2mm φ ピンホール漏えいを対象に検討したところ、漏えい量の 100 倍の

- 換気量（CNG 相当）にて、定常状態に達した場合は、最大過圧は 8kPa
- ・漏えい 20 秒後で着火した場合は、2kPa であり、着火時間の影響は大きい。
- ③ 保炎性及び濃度変動による着火性と火炎伝播性の検討
- ・火炎が持続しない放出条件があり、保炎範囲の条件（圧力と流量の関係）を実験的に把握
 - ・平均濃度が 2% では、影響度としては無視できる程度となることを、限られた条件ではあるが確認
- ④ 70MPa 規制見直しのための拡散爆発実験装置に関する設計の一部実施
- 70MPa 充てん水素スタンド規制見直しのための拡散爆発実験の装置設計を実施し、仕様及び装置の概要を明確にした。
- ⑤ 70MPa 規制見直しのための CFD によるデータの一部取得
- ・拡散計算を実施し、40MPa 以下と同様に、ほぼ無次元距離で濃度が整理できることを確認し、圧力と口径が決まれば、風下地点の濃度を求めることができる見通しが得られた。
 - ・爆風圧計算によれば、本計算条件の範囲では、最大（80MPa, 1mm）の場合でも、6m において最大過圧は 700Pa 程度、最大インパルスは 4.5Pa・s 程度と推定される。
 - ・火炎計算によれば、60～80MPa における火炎スケールは、40MPa 以下と同じ近似式で表される。
- ⑥ 70MPa 充てん対応水素スタンド規制見直しのためのデータ取得・解析
- H15-16 年度に製作した 35MPa 充てん対応水素スタンドの規制見直しデータ取得用の実験設備を、70MPa 充てん対応に改造し、以下のデータを取得すると共に、数値シミュレーション（CFD）により補完を行った。
- ・80MPaにて0.2mmφからの漏えい時の1/4LFL距離は、実験式より7.6mとなり、40MPaと同様に、無次元距離で整理できる。
 - ・80MPaの水素の定常漏洩時には、最大過圧及びインパルスは、1mmφ，L（距離）=6mにおいて、それぞれ約400Pa及び約1.3Pa・sであり、0.2mmφではさらに小さく影響度としては小さい。
 - ・80MPaにおいても、40MPaと同様に、火炎長は流量Mの0.5乗に比例し、1mmφで火炎長は3.3mとなる。
 - ・火炎からの輻射熱流束を表す実験式を得るとともに、火炎の高温ガスからの対流熱伝達量をシミュレーションにより求めたところ、これらを合計した受熱量は、80MPa、1mmφ、距離6mにおいて、高さ2mの位置で約2870W/m²であり、10～20sで苦痛を感じるとされる熱量（4650W/m²）よりも小さい値である。
- ⑥ 蓄圧器の取り外し、梱包
- 株式会社日本製鋼所にて製作して拡散爆発着火実験に使用した蓄圧器 2 基を、実験終了後に、東邦ガス（株）へ供用換えを行った。

(3) 水素スタンド構成機器の安全性検証及び性能検証

① 蓄圧器、配管等の安全性検証（日本産業・医療ガス協会）

- a. 70MPa 充てん対応水素スタンドの安全性検証においては、当初、プレクールを行わない新設スタンドの場合の想定事故シナリオ抽出、35MPa 充てん対応水素スタンドを改造する場合のスタンドモデルの検討および想定事故シナリオの抽出を行って、それぞれの事故シナリオに対して安全対策案を検討した。
- b. 安全対策の検討に当たっては、同じ圧力レベルの国内の高圧ガス設備、海外の 70MPa スタンド等、既設設備を対象にして使用機器、配管、材料を調査した。又、国内外のメーカーを調査して現状把握に基づいた安全対策を検討した。
- c. これらの結果はリスクマトリックスの可能性評価データとして使われ、別途検討された影響度評価データと組み合わせて、リスク評価が実施された。そこから抽出された安全対策は省令、例示基準見直しのための技術基準案としてまとめられた。

② 水素ガスディスペンサーの安全性検証（タツノ・メカトロニクス）

a. 各種機器の安全性検証について

- ・遮断弁もれモード解析（35MPa）では、3社の製品について解析し、適切な構造（グランドパッキンとOリング）と日常点検での漏洩検査の実施が有効であることがわかった。
- ・過流防止弁の安全性検証（30MPa）では、通常充てんでは作動せず、事故時には作動することを確認し、安全対策として有効であることを確認できた。
- ・コリオリ流量計の安全性検証（35MPa）では、圧力インパルスの繰り返しに対する耐久性を確認した。3万回（3年間）で精度は変化しなかった。
- ・安全弁の安全性検証（35MPa）では、3回の作動試験、3万回のシール性耐久試験を行い、安全弁の有効性を確認できた。ただし、シールは構造と加圧脱圧頻度に応じた検査及び維持管理が必要であることがわかった。
- ・コリオリ流量計の安全性検証（70MPa）では、95MPa 水素暴露下における指示精度変化、気密性、水素脆化影響を検証した。その結果、10年相当でも指示精度に大きな変化はなく、気密性の問題は無かった。また、フローチューブの内壁にも水素脆化による劣化は無かった。この結果、10年相当での事故に至るリスクは無いことが判明した。
- ・流量調整弁の安全性検証（70MPa）では、6万回（6年相当）の動作試験で、漏れは微少であり、増し締め等による対応が可能であることを確認したが、1回/1年程度の点検等を行うことが望ましい。
- ・遮断弁の安全性検証（70MPa）では、9万回（9年相当）の動作試験で漏れは微少であり、増し締め等による対応が可能であることを確認したが1回/1年程度の点検等を行うことが望ましい。
- ・ホースの安全性検証では、プレクール設備使用時の安全性確認の為、使用温度を-30℃に設定し、低温応力繰返し試験、冷熱繰返し試験、低温屈曲繰返し試験及び試験後の破裂試験を行った。結果、低温応力繰返し及び低温屈曲繰返し試験では9万回（9年相当）の充てん回数相当で微少のもれに留まり、危険性は無いこ

とが確認されたが、1回/1年程度の点検等を行うことが望ましい。冷熱繰返し試験は、200回実施したが、微少な漏れであった。なお、供試ホースは、その後の破壊試験でも劣化は認められなかった。

b. 70MPa 充てんシステム及び機器調査について

- ・70MPa 対応機器の動向調査により、各機器の完成度、安全性等が確認でき、検証内容及び手法の検討に有益な情報入手ができた。
- ・特に、安全性に関する強度及び材質 SUS316L や SUS316 の使用状況を確認し、使用可能な材質の範囲拡大の必要性を確認し、今後の安全性検証内容の検討に有益な情報を得た。
- ・その他、トライボロジー、通信充てんでの課題等に関する情報を得た。

c. ディスペンサーの充てん制御基礎検証試験

70MPa 対応ディスペンサーにより 35MPa での充てんを実施し、70MPa 対応機器の動作を確認した。結果、最大流速から低流速で正常な充てんが行われ、70MPa ディスペンサーの基本的制御方法、各機器の作動状況を確認でき、検証試験方法が確立できた。

d. 高圧ガス設備法定検査

水素製造設備及び高圧ヘリウム設備に関し、自主検査を行うと共に、法定の保安検査を受け、検査結果が良好であることを確認した。

(4) 高圧水素圧縮機の安全性検証(日本製鋼所)

- ① 現状の設計法規、手法に基づく予測寿命の信頼性を検証するため、設計・解析と実機での運転検証を行った。
- ② 設計段階では疲労の形態を高サイクル疲労と低サイクル疲労に分けて、水素スタンド耐用年数を考慮して検討を行った。高サイクル疲労については、35MPa 充てん対応圧縮機の 2,500hr 定格運転と非破壊検査により亀裂の発生が無かったことを確認した。また、低サイクル疲労については、実機と同等の応力が負荷される模擬試験体を製作し、部材の断続運転を想定した 35,000 回の起動停止を模擬した加速試験を実施しその内面調査により部材の健全性を確認した。
- ③ 耐圧部適用材料に関する検討では、実機サイズブロック鋼材の熱処理調査を行い、焼入れ性と成分マクロ偏析を考察する高張力鋼 (SNCM439、SNC836) の特性データを取得し、強度と靱性のバランスのとれた調質条件として引張り強度 850~950N/mm² の特性データを取得した。
- ④ 水素圧縮機構成機器の安全性検討として運転した機器の評価を行った。累積 2,500 時間の定格運転に供した後の、自動弁と逆止弁を分解点検した結果、弁本体に異常は確認されなかったが、シール部には摺動シール部材の摩耗粉と考えられる汚 汚の付着を確認した。
- ⑤ その結果、長期的な運用における性能維持の観点から、圧縮機消耗品交換に合わせた定期的な分解点検・清掃が有効であるとの結果を得た。また、O リングブリスト対策とし

て金属製 C リングの評価を行い、適用部位によっては耐圧シールの有効な方法の一つであることとの結果を得た。

- ⑥ これらの結果をもとに 70MPa 充てん対応耐圧部のモデル設計、周辺構成機器の検討を行い、安全を維持するための設計課題の抽出を行った。

(5) 水素スタンド構成金属材料の評価(日本製鋼所)

- ① 45MPa までの金属材料健全性の検証(鋼製水素蓄圧器に要求される材料諸特性の検討結果)

高压化した場合の圧縮水素の蓄圧器鋼材を選択するためには、以下の手順により進める必要がある事が示された。

- 既存圧力容器用材料における高強度鋼のリストアップ
- 高压化にあたっての適用板厚上限の確認
- 水素脆化を防止する適切な鋼材強度上限の確認

候補材の選定にあたっては、既存圧力容器用材料について、高压ガス保安協会の特定設備検査規則別表第一表および、ASME B&PV Code における Materials Part D より高強度鋼をリストアップした。その結果、35MPa 充てん対応蓄圧器として既の実績のある SCM435 鋼に加えて、より高压化への対応が期待される SNCM439 鋼、および高強度であり、低温靱性に優れた SHY685NS-F 鋼、さらに米 ASME 規格によるニッケルクロムモリブデン鋼: SA723 鋼を候補材として挙げた。このうち SCM435 鋼、SNCM439 鋼および SHY685NS-F 鋼を当面優先的に試験・評価を行うこととした。

- ② 45MPa までの金属材料健全性の検証(水素蓄圧器候補材の大気中特性試験結果)

高压化した 70MPa 充てん対応蓄圧器の場合、SCM435 鋼を適用すると、板厚は 40mm 程度が限界であると結論された。したがって、焼入れ性に優れ、材料の適用板厚を満足可能な SNCM439 鋼などを候補材とする事とした。

- ③ 45MPa までの金属材料健全性の検証(水素蓄圧器候補材の 45MPa 水素雰囲気下における脆化感受性試験結果)

SNCM439 鋼等について強度上限を設定するための水素環境脆化感受性試験を実施した。その結果、大気中引張強さが約 1,000MPa を超えると水素中切欠引張強さが低下することが明らかとなり、45MPa 水素中で使用する候補材の強度上限は、大気中引張強さで 1,000MPa 前後が適切と考えられる。上記の結果より、SNCM439 強度低減材と SHY685 が 45MPa 水素環境中で優れた耐水素環境脆化特性を有することが明らかとなった。

- ④ 45MPa 蓄圧器の評価(口金部に認められるしわに関して)

蓄圧器口金部で検出された欠陥は熱間加工時に形成されたものであり、高压水素蓄圧器として供用中に進展したものではないが、有害なしわが発生しない様に製造するか、有害なしわは除去することが望ましい。

- ⑤ 45MPa 蓄圧器の評価(実機肌表面の水素脆化におよぼす影響に関して)

内面に酸化スケールを伴う実機内表面肌は、大気中、窒素ガス中或いは水素中に関わ

らず、機械加工表面肌と比較して疲労寿命が低下することが示された。また、水素雰囲気下では、応力振幅が大きくなると疲労き裂が早期に発生する傾向を示した。

⑥ 45MPa 蓄圧器の評価（水素雰囲気下における機械加工表面の影響）

研削加工されたままの表面層では、強い引張残留応力が発生しており、これにより疲れにおける平均応力が上昇し、水素雰囲気下における疲労寿命が大気中に比して著しく低下する事を明らかとした。したがって、熱処理が終了した後に機械加工を受ける部位については、焼鈍処理等により加工表面に生じている引張残留応力を低減させるか、自緊や研磨加工等、圧縮の残留応力を付与することが望ましい。

⑦ 45MPa 蓄圧器の評価（水素環境脆化におよぼす鋼中不純物の影響検討）

水素雰囲気下では介在物等の不純物が脆化起点として作用する事が示された。どの介在物が、水素環境脆化に有害かは現状で特定されていないが、硫黄の量については、MnSの形成は延靱性を損ない、異方性を増すので、できる限り低減することが望ましい。

⑧ 70MPa 充てん対応水素スタンド構成金属材料の評価（SNCM439 鋼強度低減材の 90MPa 水素雰囲気下での安全性の検証試験結果）

SNCM439 強度低減材について、90MPa までの水素雰囲気中の疲労試験を行った。その結果、想定される繰り返し使用変動応力下では、有害なき裂が発生しないことを確認した。また、90MPa までの水素雰囲気中における疲労き裂進展速度を測定した。その結果、SNCM439（強度低減材）は、SNCM439 鋼と比較すると疲労き裂進展速度は大幅に低下し、強度低減による効果が認められた。き裂進展解析に必要なき裂進展下限界応力拡大係数(K_{IH})を算定するために、金属ブロックに予き裂を導入した試験片(1T-WOL)に荷重を加えながら水素雰囲気中に 1,000 時間暴露させる試験を行った。その結果、試験荷重 $K_{Iapp}=35, 40$ および $60\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 負荷した各条件において、試験暴露後において水素環境脆性のき裂進展は認められなかった。また、水素中でのき裂進展限界値を求めるために、ライジングロード試験法と遅れ割れ試験法の結果を比較した。その結果、何れのヒートにおいても、ライジングロード（荷重漸増）下におけるき裂進展限界： K_{IH-R} が最も小さい値 ($K_{IH-R} < K_{IH-H}$) を示すことから、容器の水素中破壊限界荷重を算定するには、ライジングロード試験法により得られる： K_{IH-R} を採用することが最も安全側の評価であると考えられる。

⑨ 鋼製水素蓄圧器への水素侵入挙動の評価（長期高圧水素曝露による水素侵入量評価と機械的性質におよぼす影響の評価結果）

85°C、85MPa までの低温、超高压水素条件下における長期曝露試験の結果、SNCM439、SCM440 および SCM435 の各鋼種とも水素曝露前と比較して水素量が増加することが明らかとなった。さらに、温度依存性については温度が低くなるほど高温度域で求められている従来式の外挿値より高濃度側に曲がる傾向を示し、低温、超高压水素条件下における水素侵入挙動を更に詳細検討する必要性が示唆された。

さらに、SCM435 鋼について長期水素曝露を行い、水素未曝露材および水素曝露材について機械特性試験を行った。その結果、切欠引張試験の歪速度が $1 \times 10^{-6}/\text{s}$ の条件においてのみ、切欠底のごく一部に水素脆性破面を特徴づける擬へき開破面が生じているのが認められた。したがって、蓄圧器が 85°C、85MPa の条件に長期間晒された場合、内部水素侵

入した水素によって、介在物などの応力集中が生ずる箇所などで水素脆化を起こす可能性が示唆された。

⑩ 鋼製水素蓄圧器への水素侵入挙動の評価（変形過程における鋼中への水素侵入挙動の評価結果）

鋼製水素蓄圧器への水素侵入挙動を評価するため、水素ガス中での引張変形に伴い鋼中に侵入する水素の挙動を調査した。本研究では侵入した水素の量や水素のトラップエネルギーを求め、鋼中における水素の存在状態を評価することを目的とした。その結果、転位が水素のトラップサイトとして機能していることを表している事が示された。また 33kJ/mol のエネルギーに対応するトラップサイトは、引張変形中に生成した空孔が有力である事が示された。

⑪ 非破壊検査・構造検討（45MPa 高信頼化蓄圧器製造方法の検討結果）

製造工程での内表面研磨処理、成形形状の改良によりしわの低減が確認された。また、従来型ポンベ形状の蓄圧器の危険部位の評価を実施し、口絞り部コーナーでの応力集中が確認された。

⑫ 非破壊検査・構造検討（70MPa 充てん対応水素蓄圧器の構造検討結果）

従来型ポンベ形状での応力解析を実施した結果、45MPa 蓄圧器と同様に、口絞り部コーナーで応力集中が確認された。70MPa 充てん用蓄圧器の構造として、両端の成形部分が無い、開放されたシンプルなシェル構造を提案した。 高圧化に伴う耐圧強度計算での厚肉化においても十分焼入性が確保でき、また成形後の内表面加工および検査が可能であり、有害な欠陥の確認除去が実施できる構造とした。

⑬ 非破壊検査・構造検討（非破壊検査の検討結果）

a. 70MPa 充てん蓄圧器の供試体検討結果(高圧昭和ポンベ)

ア. 口絞り部の超音波探傷および目視検査

フェーズドアレイ超音波探傷の斜角探傷を用い、口絞り部内面の探傷を実施したが、しわからの反射と思われる信号は検出されない。また、口金部とそれに繋がる機械加工の傾斜面は口金部の穴から挿入した CCD カメラによって検視を実施した結果、しわと判断されるものは認められなかった。

イ. 成型頭部および口絞り部の内面側からの目視検査、磁粉探傷検査

成型頭部を2分割にした後、内面の目視および磁粉探傷検査を実施した。その結果、目視ではむしれ等が観察されたが、しわと判断されるものは認められない。また磁粉探傷検査では微小な磁粉指示模様が検出された。検出された磁粉指示模様の部分は、黒皮の表面が除去された状態のため、黒皮下のしわに磁粉が付着したものであり、この磁粉模様をグラインダーで除去すると、0.1~0.2mm の深さで除去された。

b. 70MPa 充てん蓄圧器の供試体検討結果(住金機工)

ア. 口絞り部の超音波探傷検査および目視検査

フェーズドアレイ超音波探傷の斜角探傷を用い、口絞り部内面の探傷を行ったが、しわからの反射と思われる信号は検出されない。また、口金部とそれに繋がる傾斜面は胴部側から挿入した CCD カメラによって検視を行った結果、内面全周に起伏が認められたが、

しわと判断されるものは認められない。

イ. 成型頭部および口絞り部の内面側からの磁粉探傷検査、目視検査

成型頭部を2分割にした後、磁粉探傷検査を行った結果では、内面の絞り部に線状の起伏が見られ、これらに磁粉が付着している。磁粉指示の一部をグラインダーで黒皮が無くなるまで研削し、その後磁粉探傷を行うと起伏部に付着した磁粉模様がそのまま現れ、線状のしわが見える。磁粉指示模様の一部をグラインダーで研削した結果、最大深さ0.5mmで除去された。

⑮ 非破壊検査・構造検討（製造・稼動中の検査手法の検討結果）

a. 蓄圧器絞り部のしわ検出精度の検討

ア. フェーズドアレイ超音波探傷法の検討

深さ1mmからのしわの検出は70MPa 供試体蓄圧器の形状で可能であった。しわの深さと検出されるエコー高さには相関関係が見られ、適切な感度設定によっておよそのしわ深さの推定が可能となる。また内面の肌の程度、起伏の程度は検出可能なしわ大きさに影響し、起伏が大きいとしわエコーが低下し、内面反射エコーが高くなり、しわエコーをマスクする。このため、現状の70MPa 供試体蓄圧器内面状況を基準に管理する必要がある。

イ. TOFD 超音波探傷法の検討結果

スリットの探傷結果では0.8mmのスリットも検出可能であったが、底面エコーと重なった状態であり、スリットのように明瞭なエコーが検出されない自然きずでは底面との判別が困難と思われる。1.5mmのスリットではきず信号が底面と明瞭に分離しており、1.5mmからであればしわのようなきずでも検出可能である。

b. 蓄圧器の AE ノイズ計測調査結果

昇圧時、可変圧系、高圧系とも、AE計測を行う上で特に大きな支障となるノイズの発生は、認められなかった。水素の加圧および流入によるノイズも、計測されなかった。バルブ切替え時に、大振幅・大エネルギーのノイズが一瞬発生した(両系とも)。計測されたAEエネルギーの大半は、このバルブ切替え時のノイズによるものであった。

バルブ切替え時に発生するノイズは運転記録を参照することにより特定可能であり、AE計測上の支障とはならない。バルブ切替によるノイズ以外に計測されたノイズは主として風によるタグプレートの揺れによるもの等であると考えられ、それらは小振幅・小エネルギーであった。従って、風で揺れるもの(タグプレート等)がある場合は、事前に対策しておくことが望ましい。

c. AE 伝播特性および位置評定特性の調査結果

本位置標定試験からは、以下の結果が得られた。

外面に擬似 AE 源を設置した場合は、胴部・鏡部ともに良好な精度での位置標定が可能であった。適切な伝播速度を設定した場合、位置標定誤差は数 mm 程度であった。

胴部外面に設置した4個のAEセンサにより、内面鏡部ノズルネック部までの位置標定が可能であった。

上記から、実機蓄圧器にAE法を適用する場合、蓄圧器1基あたり8個のAEセンサを

取り付けることにより、両鏡部内面の位置標定が可能である。

内面に擬似 AE 源を設置した場合(内面に AE 発生源が存在する場合を想定)は、伝播速度を 10%程度小さめ(遅め)に設定することにより最適化され、ほぼ良好な精度での位置標定が可能であった。内面に擬似 AE 源を設置した場合、位置標定結果が多少ばらつくことがあったが、これは内面では曲率半径が小さいため擬似 AE 源を完全に固定できなかったことによる。外面に AE 源が存在する場合に適合するよう伝播速度の設定を行っている場合、内面に存在する AE 源に対しては位置標定誤差が発生することを考慮する必要がある。

(6) 保安関係等の検討(石油産業活性化センター)

保安関係等の検討について、以下の成果が得られた。

- ① 保安検査の周期延長に関して、非破壊検査による検査手法について実スタンドの蓄圧器を用い検討を行った。その結果、ボンベ型の絞部外表面からフェーズドアレイ検査をすることで、深さ 1mm 以上のしわは、シワの位置と有無について検出が可能である。

TOFD 法の計測精度は、蓄圧器の内・外表面の凹凸、内面外面形状、肉厚変化、しわ形状などの影響を受けることが懸念され、更に精度を向上させる必要がある。

- ② 改質装置の夜間無人暖気運転の検討については、平成 18 年度に総務省消防庁に設置された、「水素供給施設の安全対策に関する調査検討会」で、本調査と併せ「水素スタンドをセルフ給油所に併設」、「水素スタンドの単独設置」、「水素ガスエンジンの給油取扱所への乗り入れ」に関して、財団法人石油産業活性化センターでの検討結果を基に検討を行った。その結果「改質装置の夜間無人暖気運転」は、水素スタンドが少ない現状において規制を見直すことは、時期尚早と判断された。
- ③ 水素スタンドのリスクアセスメント技術の構築では、ハザード摘出部分への従来知見に加え、故障率データ作成手法の検討を行い、リスクアセスメント支援システムを構築した。

(7) 水素スタンド安全対策の追加検討(石油産業活性化センター)

水素スタンドの安全対策の追加検討について、以下の成果を得た。

- ① 計装安全関連の検討

35MPa 充てん対応水素スタンドモデルのリスク評価において、リスク H として残留した想定事故シナリオは 9 件存在した。その中で配管、ホースの破断による大量漏洩が 3 件と最も多かった。そこで、配管破断による大量漏洩を防止する安全対策案について調査することとした。

- ② 適応可能性評価

- a. 蓄圧器および圧縮機の屋上設置あるいは地下設置の適応可能性検討

地下設置については、蓄圧器室モデル 2 種類（コンパクトなモデル、メンテナンス性を考慮したモデル）、圧縮機室モデル 1 種類を作成し、リスク評価の実施ならびにコンピューターシミュレーション (CFD) を利用して水素漏えい時の水素拡散状況を把握した。蓄圧器室を閉鎖空間とせず、一部開放することで地下設置の可能性が示唆された。ただし、

規制見直しにむけて更なるデータの蓄積が必要であることが分かった。

屋上設置については、圧縮機と蓄圧器をキャノピー上に設置するタイプと事務所上に設置するタイプの2種類を想定し、地震に対する地盤非線形応答解析等の検討を行なった。

また、現状で認められている国内CNGスタンドや米国の水素スタンドを調査した。検討の結果、建築構造物に要求される機能は地震時に倒壊しないことが必要で、耐震構造や免震構造にする必要があることが分かった。その対策としては、圧縮機と蓄圧器を屋上に設置することを前提に現行の建築基準法で設計すればよいことが分かった。

b. 配管系及び蓄圧器の最小化の適応可能性検討

配管内径を1mmとすることで配管破断時の影響度を低減できるが、燃料電池自動車への充電時に流量が確保できない。このことから適用は不可能であると考えられる。

蓄圧器容量最小とした場合、改質器、圧縮機の増設、および複雑な運転制御が必要となった。蓄圧器を設置しない場合、水素ホルダーおよび圧縮機の増設、車両充電に対して圧縮機の制御が必要となった。エンジニアリング会社によると、どちらも運転制御の複雑さやコスト高が懸念されるとのことであった。現段階では、困難と考えられる。

c. 水素スタンドを屋内給油取扱所に併設する可能性検討

平成16年度までの検討で、水素スタンドを給油取扱所へ併設することが可能となった。しかし、これは屋根（以下、キャノピーという）の小さい屋外給油取扱所に限定されていて、キャノピーの大きい屋内給油取扱所には併設できないことが分かっていた。そこで、水素スタンドを屋内給油取扱所に併設するための検討を行ない、「水素供給施設の安全対策に関する調査検討会」（総務省消防庁）に提案し議論した。その結果、電気設備は防爆構造にするなどの安全対策を追加することによって、水素スタンドを屋内給油取扱所に併設することが可能との判断が示された。

d. 水素スタンドをセルフ給油取扱所に併設する可能性検討

平成16年度までの検討で、水素スタンドを給油取扱所へ併設することが可能となった。しかし、これは従業員が給油するフルサービスの給油取扱所に限定されていて、顧客が自ら給油するセルフサービスの給油取扱所には併設できないことが分かっていた。そこで、水素スタンドをセルフ給油取扱所に併設することを可能とするための条件検討を行い、上記の検討会へ提案して議論した。その結果、水素スタンドをセルフ給油取扱所に併設する場合は、水素充電車両のセルフ給油取扱所への誤侵入防止措置が必要となること以外は現行の安全対策で対応可能との判断が示された。

e. 水素スタンドを単独設置する場合の離隔距離を短縮する可能性検討

危険物を原燃料とする改質器を持つ水素スタンドを単独で設置する場合において、危険物の一日の取扱量が指定数量を超えると危険物施設となり、消防法上の一般取扱所として規制される。一般取扱所は、高圧ガス施設との距離を20m以上離すことや一般取扱所の周りに3~5mの保有空地を確保する必要がある。そこで、水素スタンドを単独設置する場合の離隔距離を短縮することを可能とするための検討を行なった。その結果、大型改質器を持つ水素スタンドを単独設置する場合においても一般則第7条の3第2項に従えば、高圧ガス施設との距離（20m）並びに保有空地は不要との判断が示された。

f. 水素ガスエンジン自動車の給油取扱所への乗り入れに関する可能性検討

消防法上、水素スタンド併設の給油取扱所において、燃料電池自動車への水素充てんは可能であるが、水素ガスエンジン自動車への水素充てんはできないことになっていた。そこで FCV のモーター部の到達温度や水素ガスエンジン自動車とガソリン自動車のエンジン部や排ガス出口の温度を比較するなどの検討を行なった。検討の結果、消防庁の調査検討委員会において、水素ガスエンジン自動車が給油のために給油取扱所および水素スタンド併設給油取扱所へ乗り入れることによる危険性は発生しないことが示された。さらに、本件は「危険物規制事務に関する執務資料の送付について」（消防危第 68 号 平成 19 年 3 月 29 日）において、各都道府県消防主管部長、東京消防庁・各政令指定都市消防長へ通知された。

g. 障壁を設置した場合の迂回距離を短縮する可能性検討

圧縮天然ガス（CNG）スタンドと液化天然ガススタンドに関する規制の中には、高圧ガス設備の周囲に有効な障壁を設置することにより、敷地境界距離（6m）を短縮させることができる考え方がある。そこで、CFD シミュレーションを使って検討を行ない、規制当局である経済産業省原子力安全・保安院保安課へ提案した結果、例示基準 56 の 2. 敷地境界に対し 6m 以上の距離を有することと同等の措置（特定圧縮水素スタンド）として採用された。

e. 前項にて抽出した安全対策の適応可能性検討

配管、ホースの破断時に大量漏洩を防止し、発災した場合の影響を低減させるための安全対策の設定条件を過流防止弁を使用して調査検討した結果、以下の通りとなった。

- ・破断して作動し遮断するまでの時間は、数ミリ秒以内とする。
- ・設置する場所は、必ず蓄圧器の出口に設置し、そこから 25m 毎とする。

(8) 圧縮水素運送自動車用容器の安全性検証(大陽日酸(日本産業・医療ガス協会との共同実施))

- ① 運送用複合容器の安全性検証として、容器と容器固定治具単体に衝撃が負荷された場合を想定し、落下試験及び台車衝撃負荷試験を実施した。
- ② 落下試験では試験体の落下高さ、容器と容器固定治具の取付け方向（上向き、横向き、下向き）をパラメーターとして試験を行った。落下高さ 3,000mm までの条件では、35MPa 水素ガス重点容器の二次的被害（容器の飛び出し、水素漏れ等）と考えられる現象は無いことが確認できた。
- ③ 台車衝撃試験では、時速 50Km 相当までの範囲において動的な衝撃負荷を与えても容器と容器固定部に問題となるような変位・ずれは生じていないことが確認できた。
- ④ 圧縮水素運送自動車用容器の輸送時の事故を想定した安全性を検証するため、容器単体容量 360L の複合容器 25 本を搭載できる集合容器フレームを供試体として作製した。集合フレームには、35Mpa 水素充填容器（高圧ガス保安協会が認証した実績の有る 205L 複合容器）、35MPa ダミー容器 4 本、ダミー鋼管 20 本の合計 25 本を搭載した。本供試体を用いて横転事故を想定した衝撃負荷試験を実施した。その結果、二次的被害(容器の損

傷、フレームからの飛び出し、水素漏洩など)が無いことが確認された。ただし、試験実施後の供試体からは、側面衝撃を受けた際のフレーム塑性変形の影響が認められた。

(9) 車載容器用複合容器を利用した蓄圧器の安全性検証(大陽日酸(日本産業・医療ガス協会との共同実施))

- ① 輸送用複合容器が蓄圧器として利用可能なことを蓄ガス時の圧力と温度の関係により示すため、既存の蓄圧器に関する充填データの収集・整理を行った。その結果、蓄圧器用の充てんデータとして複合容器への緩速充てんデータを収集する必要がある。
- ② 複合容器を蓄圧器として利用するための基準は現時点では制定されていない。そこで複合容器を用いた蓄圧器の試験方法について調査を実施した。
- ③ 70MPaでの蓄圧器への緩速充てん試験を実施し、急速充てんではガス温度の顕著な上昇により、容器表面温度の変化は着目されないが、緩速充てんではガス温度の上昇が緩やかであるため、容器表面温度の変化を検討することが必要であることが判った。
- ④ 技術基準案作成に向けての検討課題は下記のとおり。
 - a. 蓄圧器として使用する際の充てん圧力領域、繰り返し充てん回数の考え方の明確化と設計確認試験のサイクル試験回数、試験温度領域についての見直し
 - b. 蓄圧器の検査方法について水素スタンドにおける使用方法が加味された基準の検討
 - c. 設置スペースが限られた水素スタンドでは、スペースを有効利用するために天井設置や縦型固定による設置が考えられ、その安全性に関する検討が必要。

(10) 実水素スタンドによる安全対策等の検討と検証(出光興産(石油産業活性化センターとの共同実施))

平成18年7月に、千葉県市原市に給油所併設型水素スタンドを設置し、一般高圧ガス規則第7条の3第2項、危険物の規制に関する規則第27条ノ5、建築基準法別表第2及び建築基準法施行令第130条の9の4に準拠した国内初となる給油所併設型水素スタンドを設置した。このため、障壁、散水設備強化、SUS 316Lへの配管材料変更、過流防止弁設置等、新法令により追加された安全対策を設置し、保安検査等の簡素化のためのデータ収集、新たに追加すべきあるいは簡素化すべき安全対策の検討・検証を行った。

その結果、

- ① 過流防止弁は誤作動がなく安定した使用が可能であった。
- ② 圧力リリーフ弁は圧力リリーフ機能に問題は発生しなかった。放出量は、規定のオリフィス径では、50L/secであるが、理想気体からのずれの影響等により放出量は13.3L/secで規定量の1/3程度となった。オリフィスの形状によってチョーク現象が現れることも考慮し、オリフィス形状等について、更なる技術的検討が必要と考えられる。
- ③ バルブOリングの耐久性試験では、約315,000回の開閉をおこなった。初めに45,935回でかに泡状の極微小漏れが発生したが、大きくなることは無く微小漏れで安定した。漏れについては、グラウンドのまし締めにて漏洩を解消できた。その後、継続的に試験した結果、1.5年間の耐久性を確認した。微小漏れは約32,000～45,000回で発生しており、

年間1回の弁の点検が必要なことを確認した。

- ④ 圧縮機の長時間連続運転では、3,013 時間連続運転した。保安検査は、1,168 時間及び2,184 時間で行い、2 回目の検査でピストンリング等に摩耗があり交換した。6 ヶ月程度で摩耗が大きくなることが予想され、1 年間を通しての無点検は困難と思われる。
- ⑤ 蓄圧器の非破壊検査手法として、斜角超音波探傷試験を行った。0.3mm の切り欠き溝の検知が可能であったが、探傷作業の自動化の検討が必要である。
- ⑥ 保安全管理指針案の指針作成に向け、水素製造装置、PSA、圧縮機、蓄圧器、ディスペンサー等について 故障項目と対策をまとめた。
- ⑦ 蓄圧器の直射日光防止措置として、蓄圧器の側面に直射日光防止シャッターを設置したところ、直射日光を受けている配管温度と蓄圧器表面との温度差が、秋~春においても2~3℃、夏場では5℃程度の温度差が生じ、効果があることを確認した。
- ⑧ 輻射熱防止効果と散水量の削減について、シャッター等は散水量の削減に対し有効であることが示唆された。
- ⑨ 改質器の無人運転において、3 日間の連続運転を2セット実施し、改質器の安全対策が支障なく機能することを確認した。尚、ガソリン・ナフサは可燃性ガス検知器による漏洩監視、緊急運転停止が可能であるが、灯油では困難であり、他の漏洩監視手段の検討が必要であると考えられる。

(11) 実水素スタンドによる規制見直しと適合性の検討（エンジニアリング振興協会(石油産業活性化センターとの共同実施))

実スタンドにおける見直された規制等の適合性を検証し、水素スタンドの更なる規制緩和を目的に、以下の調査・検討を行った。

- ① 供給水素純度と不純物分析法の検討として、現状 FCV 用に供給している JHFC ステーションの供給水素の純度と水素の分析法について調査を行った。なお、CO 濃度については連続監視、その他は年1回の分析を行っている。
- ② 水素純度測定方法の検証と制約緩和について、CO が ISO 基準 (0.2ppm) を満たしている限り、その他成分が JHFC 基準値を超えることは無いと考えられる。市原スタンドステーションでは、CO 濃度が ISO 基準を満足しており、制約を緩和する必要はなかった。不純物のうち、水素中の水分は ppm オーダーでは燃料電池への影響は無いが、プレクレーター充填時は相変化による影響に留意する必要があることから、外気温、圧力、露点をの関係を明らかにした。-40℃では、計算上 0.2ppm 以下にする必要であり、露点計の下限值 (0.5ppm) 以下とする必要があることがわかり、実際にも JHFC データで下限値未満であることを確認した。不純物の定量限界や測定間隔についても併せて調査を実施した。
- ③ PSA 切り替え時間の変更等による水素純度と製造コストへの影響について、市原ステーションで吸着時間を変化させ、CO ガス濃度を監視しながら数時間運転したが、ガス濃度に問題はなかった。
- ④ ディスペンサーの国内規格の根拠と適合性について、調査を実施した。

a. 緊急離脱カプラー、充填ホースの規格の適合性の検討

2 つともメーカー規格により製造されている。

緊急離脱カプラーは消防法、高圧ガス保安法で規定されているが、技術基準はない。類似基準として LPG の民間用バルクローリー製造基準があり、参考にされている。

b. 静電気除去接地アースの適合性の検討

車両の帯電と電位変化等を検討した結果、セルフサービス型ガソリンスタンドと同様に、静電気除去シートに触れることにより静電気着火が防ぐことができ、車両への接地作業は省略できるとの結論に至った。

(12) 絞り加工による蓄圧器の製造技術検討(住金機工(石油産業活性化センターから再委託))

① SCM435 の熱処理では、内面側の引張強度において規定値を満足させるべく、水焼入れによる熱処理を実施したが、絞り部の穴径寸法が内面側の焼入れ性能に大きく影響を及ぼすことが判明した。しかしながら、20mm φ の穴径においても外面と内面側の引張強度差は約 80N/mm²あり、内面の強度差を小さくするためには穴径を大きくする必要がある。

② SNCM439 (強度低減材)により、耐水素脆化特性に優れた 70MPa 充てん対応蓄圧器の製造技術確立の目途を得た。

③ SNCM439(強度低減材)及び市中材において、胴部全長を変更することで、同一加工条件、同一熱処理条件で 18l~120 l のボンベ型蓄圧器が製造できることを確認した。

(13) 鍛造加工による蓄圧器の製造技術検討(高圧昭和ボンベ(石油産業活性化センターから再委託))

① SNCM435 の熱処理結果から、蓄圧器の肉厚が最小 32mm までは、内面側の引張強さと靱性をともに所定の目標値にすることが可能なことが確認された。

② 熱処理後の蓄圧器外面側と内面側を比較すると、焼入時の冷却速度の違いによる、内面側の強度低下が確認された。外面からのみの冷却によらざるを得ないため、シャワー水冷方式で実施したが、やむを得ないものとする。

③ 70MPa 充てん対応蓄圧器では、35MPa 蓄圧器に比べ、外径に対する肉厚比が大きくなるため、頭部加工の絞り率は小さくなる。このため、シワの発生傾向は軽減されることが確認された。

④ SNCM439 (強度低減材) の水素雰囲気下での日本製鋼所の試験結果を引用し、疲労計算、き裂進展解析を行い、蓄圧器の安全性を検証した。これにより特定設備検査の事前評価を取得し工業製造を実施した。

(14) 液体水素スタンドに係る安全性評価と安全対策検討(石油産業活性化センター)

① リスクマトリクスによって影響度と可能性(頻度)を用いたリスク評価を実施した。

② HAZOP と FMEA を用いて事故シナリオを抽出し、機器の劣化・故障、ヒューマンファクター、天災等による事故のパターン化を図り、これらすべての事故シナリオに対して各

種安全対策を検討し、効果ありと判断した対策を実施した場合の評価結果を求めた。131件を評価した結果、リスクランク H レベルが 88 件から 13 件に減少した。

③ 液体水素の直接充てんするニーズは低いですが、輸送と貯蔵については、水素スタンドで気化して昇圧、FCV へ充てんすることが想定されるため、今後の活用が期待できる。

(15) 水素スタンドを想定した水素の拡散、着火、爆発の挙動確認と安全性評価(三菱重工業)

① 液体水素の噴霧圧力を 0.3MPa、噴霧口径 0,2mm で水素漏洩量を測定した。また、5L の液体水素をコンクリート上で漏洩させ、拡散のベースデータを取得した。

② 水素放出条件（流速、温度）を変えて 1%及び 4%到達距離を計測し、解析結果と比較した。解析結果は、中心部の濃度がより高く、風下方向に広がった分布を示す傾向がある。

③ 火炎の最大到達距離(Lf)を計測し、流量と Lf はほぼ比例関係にあり、実験結果と計算結果は 10%程度の誤差範囲内でよく一致していることがわかった。

④ 爆発による着火点からの距離と最大過圧の関係を計測し、実験と解析の比較を行った。実験は、周囲の風が一定でなく拡散が進むためピーク値が低くなった。

(16) 水素スタンド構成機器の安全性検証及び性能検証(日本産業・医療ガス協会)

① 貯槽の耐震性能、ベント放出の検討、隣接火災の影響等の安全対策上の検討を行った。

② これによって、「液体水素スタンドに係る技術上の基準（案）」として技術基準案作成に資するデータをまとめた。

(17) 保安関係等の検討(石油産業活性化センター)

① 液体水素ローリーの保安距離の短縮のために、事故要因等の分析、安全対策の検討、対策後の事故の影響評価等を行った。

② 結果として、ベント距離を 10m、液体水素ローリーから敷地境界まで 6m 以上を確保することを提案した。

(18) 特許出願、成果外部発表、等

① 受賞実績

三菱重工業（株）2008年12月4日 日本燃焼学会技術賞
「40MPa 高圧水素の燃焼・爆発挙動およびリスク評価」

② 出願特許件数

	H17年度	H18年度	H19年度	H20年度	H21年度	H17～H21年度
三菱重工業(株)	0	0	1	0	0	1
(株)日本製鋼所	0	0	2	1	0	3
合計	0	0	3	1	0	4

平成19年度

○三菱重工業株式会社

1) 高圧ガス流量計測装置及び流量計測方法、特願2008-043666号、三菱重工業(株)、
平成20年2月25日

○株式会社日本製鋼所

2) 高圧水素耐圧部材の疲労設計方法、特願2007-190010号、(株)日本製鋼所、
平成19年7月20日

3) 耐高圧水素環境脆化特性に優れた低合金鋼高強度鋼およびその製造方法、
特願2007-214937号、(株)日本製鋼所、平成19年8月21日

平成20年度

○株式会社日本製鋼所

1) 耐高圧水素環境脆化特性に優れた高強度低合金鋼およびその製造方法、
特願2008-125838、(株)日本製鋼所、平成20年5月13日

③ 論文・研究発表・講演

	H17年度	H18年度	H19年度	H20年度	H21年度	H17～H21年度
(財)石油産業活性化 センター	9	6	9	6	0	30
三菱重工業(株)	11	6	2	2	0	21
(株)日本製鋼所	3	2	5	6	5	21
出光興産(株)	0	0	3	1	0	4
合計	23	14	19	15	5	76

平成17年度

○三菱重工業株式会社

- 1) 岡林一木、武野計二、平嶋秀俊、千歳敬子、高圧水素ガス拡散爆発挙動及び液体水素の拡散挙動の研究開発、第19回技術開発研究成果発表会、石油産業活性化センター、平成17年5月16日
- 2) K. Okabayashi, T. Nonaka, N. Sakata and K. Chitose、Field Experiment and Numerical Simulation of Dispersion of High-pressurized Hydrogen Gas released to Atmosphere by Blow-down、PHYSMOD2005(International Workshop on Physical Modelling of Flow and Dispersion Phenomena)、平成17年8月24～26日
- 3) 岡林一木、河内昭紀、高圧水素ガス漏洩時の拡散挙動に関する野外実験と数値シミュレーション、第46回大気環境学会年会、平成17年9月7～9日
- 4) K. Takeno, K. Okabayashi, T. Ichinose, A.Kouchi, T.Nonaka, K. Hashiguchi, K. Chitose、Phenomena of Dispersion and explosion of high Pressurized Hydrogen、1st International Conference on Hydrogen Safety、平成17年9月8～10日
- 5) 坂田展康、岡林一木、野中剛、河野慎吾、千歳敬子、高圧水素タンクから漏洩した水素濃度場の非定常数値シミュレーション、日本航空宇宙学会西部支部、平成17年10月28～29日
- 6) 武野計二、岡林一木、橋口和明、野口文子、千歳敬子、40MPa高圧水素ガスの噴出火炎に関する実験的研究、環境管理、41(10)、(2005)、平成17年10月
- 7) 岡林一木、武野計二、水素インフラに関する安全技術研究、HES特別講演会水素・燃料電池の規制緩和と安全技術研究、平成17年10月6日
- 8) 岡林一木、水素安全評価技術研究への取り組み、福岡水素エネルギー近未来展、平成17年10月20日
- 9) 岡林一木、野中剛、坂田展康、武野計二、平嶋秀俊、千歳敬子、高圧水素ガスの漏洩拡散、安全工学、44(6)、398-397 (2005)、平成17年12月
- 10) 武野計二、橋口和明、岡林一木、千歳敬子、串山益子、野口文子、高圧水素噴流への着火および拡散火炎に関する研究、安全工学、44(6)、398-406 (2005)、平成17年12月
- 11) 武野計二、岡林一木、一ノ瀬利光、河内昭紀、野中剛、橋口和明、千歳敬子、高圧水素ガス漏洩時の拡散爆発現象について、水素エネルギーシステム、30(2)、78-82(2005)、平成17年12月

○株式会社日本製鋼所

- 12) 和田洋流、Evaluation of Metal Materials for Hydrogen Fuel Stations、ICHS-International Conference on Hydrogen Safety、平成17年9月8日
- 13) 和田洋流、水素スタンド機器用金属材料の安全研究（高圧水素雰囲気におけるCr-Mo鋼等の金属材料の水素環境脆性に関する研究）、水素エネルギー協会、平成17年10月6日
- 14) 和田洋流、水素スタンド構成金属材料の評価、日本機械学会 M&M2005材料力学カン

ファレンス、平成17年11月4日

○財団法人石油産業活性化センター

- 15) 菊川重紀、水素インフラに関する安全技術開発、石油産業活性化センター第19回技術開発研究成果発表会、平成17年5月16日
- 16) 菊川重紀、水素インフラに関する安全技術研究、NEDO燃料電池・水素技術開発報告会、平成17年7月12日
- 17) 菊川重紀、水素社会の未来予想図ー水素インフラの現状と将来ー、バイオサイエンスとインダストリー, **44**(8), 58-61(2005)、平成17年8月
- 18) 菊川重紀、Safety Study of Hydrogen Supply Stations for the Review of High Pressure Gas Safety Law in Japan、ICHS-International Conference on Hydrogen Safety、平成17年9月10日
- 19) 小森雅浩、The Review of High Pressure Gas Safety Law in Japan for Hydrogen Supply Stations、WHTC2005(World Hydrogen Technologies Convention 2005)、平成17年10月3日
- 20) 尾上清明、水素インフラ関連の法令見直しへの取組み、水素エネルギー協会 特別講演会、平成17年10月6日
- 21) 菊川重紀、水素インフラに関する規制の見直しと安全技術の開発、エンジンテクノロジー, **7**(6), 26-31(2005)、平成17年12月
- 22) 小森雅浩、水素ステーションの安全性検討ーリスク評価手法を使ってー、安全工学, **45**(1), 3-9(2006)、平成18年1月
- 23) 尾上清明、水素インフラ関連の法令見直しへの取組み、FC EXP02006 水素燃料電池展／専門技術セミナー、平成18年1月26日

平成 18 年度

○三菱重工業株式会社

- 1) K. Chitose, et.al., Risk Assessment Methodology for Hydrogen Refueling Station、第16回世界水素エネルギー会議、平成18年6月15日
- 2) 岡林一木、河内昭紀、高圧水素ガス漏洩時の拡散挙動に関する野外実験と数値シミュレーション(その2)、第47回大気環境学会年会、平成18年9月21日
- 3) 武野計二、岡林一木、千歳敬子、高圧(40MPa)水素噴流への着火現象及び定常火炎の特性、第44回燃焼シンポジウム、平成18年12月6日
- 4) 岡林一木、武野計二、平嶋秀俊、千歳敬子、野中剛、橋口和明、水素エネルギー利用における安全性評価技術の開発、三菱重工技報、Vol.44 No.1、2007、平成19年2月
- 5) K.Okabayashi, K.Takeno, H.Hirashima, K.Chitose, T.Nonaka and K.Hashiguchi、Introduction of Technology for Assessment on Hydrogen Safety、Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review Vol.44 No.1、平成19年3月(予定)
- 6) Takeno, K., Okabayashi, K., Kouchi, A., Nonaka, T., and Hashiguchi, K、Dispersion and Explosion Field Tests for 40MPa Pressurized Hydrogen、Special issue of "International

○株式会社日本製鋼所

- 7) 和田洋流、水素スタンド構成金属材料の評価、日本高圧力技術協会 平成18年度秋季講演会、平成18年11月16日
- 8) 服部公治、水素ステーション用圧縮機（安全性検証）、社団法人中国地域ニュービジネス協議会主催「水素利用システムの構築」研究交流会、平成19年2月15日

○財団法人石油産業活性化センター

- 9) 菊川 重紀、水素インフラに関する安全技術開発、石油産業活性化センター第20回技術開発研究成果発表会、平成18年6月7日
- 10) 山鹿 冬芽、水素インフラに関する安全技術研究、新エネルギー・産業技術総合開発機構 平成17年度成果報告会、平成18年8月3日
- 11) 尾上 清明、水素インフラに関する安全技術研究、燃料電池実用化推進協議会 第2回標準化・規制見直し動向説明会、平成18年8月29日
- 12) 菊川 重紀、日本における水素スタンド規制見直し、IEA-HIA/Annex19（水素安全）、平成18年9月6日
- 13) 菊川 重紀、水素社会に向けたインフラ構築技術の現状と課題、日本エネルギー学会誌85(9), 745-751(2006)、平成18年9月号
- 14) 菊川 重紀、水素インフラの規制見直しへのCFD適用例、FLUENT社ユーザー会、平成18年11月17日

平成19年度

○三菱重工業株式会社

- 1) K. Takeno, et.,al., Dispersion and explosion field tests for 40MPa pressurized hydrogen, International Journal of Hydrogen Energy Vol.32、平成19年6月
- 2) A. Kouchi, et., al., Dispersion tests on concentration and its fluctuations for 40MPa pressurized Hydrogen, International Conference on Hydrogen Safety, 2007, San Sebastian, Spain、平成19年9月11～13日

○株式会社日本製鋼所

- 3) K. Takasawa, et., al. , Internal Pressure Fatigue Test of CR-MO Steel in 45MPa Gaseous Hydrogen Environment, ASME PVP2007、平成19年7月23日
- 4) K. Takasawa, Y. Wada, R. Ishigaki, Y. Tanaka, T. Iwadate, K. Ohnishi, Internal Pressure Fatigue Test of CR-MO Steel in 45MPa Gaseous Hydrogen Environment, Proceedings of PVP2007
- 5) Y. Wada, et., al., Effect of Surface Machining on the Fatigue Life of Low Alloy Steel for Hydrogen Pressure Vessels, ASME PVP2007、平成19年7月23日

- 6) Y. Wada, et., al., Effect of Hydrogen Gas Pressure on the Mechanical Properties of Low Alloy Steel for Hydrogen Pressure Vessels, ASME PVP2007、平成19年7月23日
- 7) 高澤 孝一、和田 洋流、石垣 良次、田中 泰彦、高強度鋼低合金鋼の水素中塑性変形に伴う水素侵入挙動、2008 日本鉄鋼協会春季講演大会、平成 20 年 3 月 26 日

○出光興産株式会社

- 8) 吉田 剛、給油所併設水素ステーションの設置と法規制、第14回燃料電池シンポジウム（燃料電池開発情報センター）、平成19年5月17日
- 9) 吉田 剛、S S 併設型市原水素ステーションの開設と法規制、石油産業活性化センター第 21 回技術開発研究成果発表会、平成 19 年 7 月 10 日
- 10) 中村 直由、市原水素ステーションにおける水素センサー設置例、雑誌：Material Stage10月号（技術情報協会）、平成19年7月30日

○財団法人石油産業活性化センター

- 11) 結城 正、液体水素スタンドのリスク評価、石油産業活性化センター第 21 回技術開発研究成果発表会、平成 19 年 7 月 10 日
- 12) 菊川 重紀、水素インフラに関する安全技術研究、新エネルギー・産業技術総合開発機構 平成 17 年度成果報告会、平成 19 年 7 月 13 日
- 13) 三橋 弘忠、水素スタンド規制見直しに対するPECの取り組み、(財)日本産業工業会、平成19年7月26日
- 14) S. Kikukawa, Risk Management Approaches to the Japanese Regulations Hydrogen Supply Stations, International Conference on Hydrogen Safety, 2007, San Sebastian, Spain, 平成19年9月12日
- 15) S. Kikukawa, Consequence Analysis and Safety Verification of Hydrogen Station Using CFD Simulation, International Journal of Hydrogen Energy, 平成19年10月12日
- 16) H. Mitsuhashi, The Activity in the Safety Identification of Hydrogen Infrastructure, 2nd NEDO-KEMCO Seminar, 平成19年10月11日
- 17) 菊川 重紀、水素スタンドに関する安全技術研究、HPI技術セミナー、平成19年12月21日
- 18) 菊川 重紀、水素スタンドの安全管理、セイフティ・エンジニアリング、平成 20 年 2 月 29 日
- 19) S. Kikukawa, Risk Assessment for Liquid Hydrogen Fueling Stations, 7th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, 平成20年3月1日

平成 20 年度

○三菱重工業株式会社

- 1) 河内昭紀、三坂直行、岡林一木、武野計二、岩渕宏之、濃度変動による着火性及び火炎伝

播の検討実験、第22回PEC技術開発研究成果発表会、平成20年6月3日

- 2) 河内昭紀、岡林一木、高圧噴出水素ガスの濃度変動と着火性に関する実験、第49回大気環境学会年会、平成20年9月17～19日

○株式会社日本製鋼所

- 3) 石垣良次、高澤孝一、和田洋流、田中泰彦、70MPa充てん用蓄圧器材料の評価、第22回 PEC 技術開発研究成果発表会、平成20年6月3日
- 4) 高澤 孝一、高強度低合金鋼の水素中引張変形に伴う水素侵入挙動、日本鉄鋼協会・日本金属学会両北海道支部合同 平成20年度夏季講演大会、平成20年7月24日
- 5) Y. Wada、Material testing in high pressure gaseous hydrogen for storage vessels steel、17th Meeting of the BPV Project Team on Hydrogen Tanks、平成20年8月6日
- 6) K. Takasawa、Hydrogen Penetration Behavior of High Strength Low Alloy Steel with Plastic Deformation in Gaseous Hydrogen、2008 International Hydrogen Conference、平成20年9月8日
- 7) K. Takasawa、Y. Wada、R. Ishigaki、Y. Tanaka、Hydrogen Penetration Behavior of High Strength Low Alloy Steel with Plastic Deformation in Gaseous Hydrogen、Proceedings of the 2008 International Hydrogen Conference
- 8) 高澤 孝一、石垣 良次、和田 洋流、SNM439鋼の水素中引張変形に伴う水素侵入挙動、日本鉄鋼協会第157回春季講演大会、平成21年3月30日

○出光興産株式会社

- 9) 吉田 剛、市原水素ステーション、口頭発表、平成21年2月25日

○財団法人石油産業活性化センター

- 10) 山鹿 冬芽、水素社会基盤整備関連技術の開発、第22回PEC技術開発成果発表会、平成20年6月3日
- 11) 田上 博康、水素インフラに関する安全技術研究、平成19年度NEDO研究成果報告シンポジウム、平成20年6月24日
- 12) S. Kikukawa、International Journal of Hydrogen Energy、Risk assessment of Hydrogen fueling stations for 70MPa FCVs、平成20年7月25日
- 13) S. Kikukawa、IEA HIA Task19 Experts Meeting in Oslo,Norway、Approach to reduction of safety distances in Japan、平成20年9月10日
- 14) 菊川 重紀、水素スタンドのリスクアセスメント、化学工学会第74年会シンポジウム「先端化学産業技術プログラム」、平成21年3月18日
- 15) 菊川 重紀、水素スタンドのリスクアセスメント社団法人 日本化学会、平成21年3月28日

平成 21 年度

○株式会社日本製鋼所

- (1) K. Takasawa, Y. Wada, R. Ishigaki, R. Kayano、Effects of Grain Size on Hydrogen Environment Embrittlement of High Strength Low Alloy Steel in 45 MPa Gaseous Hydrogen、Materials Transactions
- (2) K. Takasawa, R. Ishigaki, Y. Wada, R. Kayano、Penetration of Hydrogen in High-Strength Low-Alloy Steel with Tensile Deformation in Gaseous Hydrogen、ISIJ International(投稿中)
- (3) 高澤孝一, 和田洋流, 石垣良次, 茅野林造、高強度低合金鋼の 45 MPa 水素中における水素環境脆化に及ぼす結晶粒径の影響、日本金属学会誌(投稿中)
- (4) 高澤孝一, 和田洋流, 石垣良次, 茅野林造、高強度低合金鋼の 45 MPa 水素下における水素環境脆化感受性に及ぼす結晶粒径の影響、溶接構造シンポジウム 2009
- (5) 高澤孝一, 石垣良次, 和田洋流, 茅野林造、SNCM439 鋼の水素中引張変形に伴う水素侵入挙動に及ぼす強度の影響、2010 年日本鉄鋼協会春季講演大会

2.3(2) 水素用材料基礎物性の研究

2.3(2)1 高圧水素タンク用ライナー材の研究開発（新日本製鐵株式会社、新日鉄住金ステンレス株式会社（新日本製鐵株式会社と共同実施））

前プロジェクトで平成16年度までに採取した SUS316L ステンレス鋼および A6061-T6 アルミニウム合金の 45MPa 高圧水素ガス中における材料特性データは、燃料電池自動車の 35MPa 級高圧水素ガス燃料タンク用ライナーやその付属部品の材料基準策定に活用された。一方、これら高圧水素ガスに曝される部品には、SUS316L や A6061-T6 だけでなくさらに多種の材料を使用したいという強い市場ニーズがあり、45MPa 級高圧水素ガス雰囲気下材料試験装置を用いて、A6061-T6 や SUS316L 鋼に加え、チタン、耐熱鋼、各種ステンレス鋼など様々な材料について数多くの特性データを採取した。

さらに平成19年度からは、燃料電池自動車の航続距離を伸ばすためさらに高圧の 70MPa 級車載容器用材料の評価ニーズに応えるべく、99MPa 級高圧水素ガス雰囲気下材料試験装置の設計～導入を行い、35MPa 級高圧機器の規準材として認定された SUS316L や A6061-T6 を中心に、70MPa 級車載容器および関連部品用材料の例示基準策定のためのデータ採取を実施した。併せてこれら取得データの信頼性検証のため、様々な金属学的解析を実施した。これら研究成果により 70MPa 級車載容器及び付属品の例示基準が H22 年に策定された。

(1) 99MPa 級高圧水素ガス雰囲気下材料試験装置の導入

既導入 45MPa 級高圧水素ガス雰囲気下材料試験装置の運転経験を基に技術改良を加え、平成18年に、最高圧力 99MPa の高圧水素ガス雰囲気下材料試験装置を導入した（図 III 2.3(2)1-1）。この装置は、70MPa 級機器に使用する材料を総合的に評価することのできる世界初の総合機械試験装置で、国内に導入された数台の後続設備のモデル装置である。主な仕様は、最高圧力 99MPa、試験温度 -45～+90℃、最大静的荷重 100kN、内部ロードセル制御による疲労試験が可能であるなど、70MPa 級機器の想定最高圧力（定常 70MPa×1.25=約 90MPa）、使用温度（厳冬期 -40℃、水素充填時 85℃）に十分対処可能な試験機である。



図 III 2.3(2)1-1 99MPa 級高圧水素ガス雰囲気下材料試験装置

(2) 高圧水素ガス環境下における材料特性評価

45 および 99MPa 級材料試験装置を用いて、財団法人日本自動車工業会などの関係機関の要望をベースに、様々なデータ採取を実施した。その主な材料を以下に示す。

ステンレス鋼： SUS316L 溶体化処理材、 水素チャージ処理材、 冷間加工材
SUS316,316L の Cr,Ni 変化材、 SUS304L 溶体化処理材、 SUS302、SUS303

低 Ni 省 Mo 鋼 (STH1,STH2)

耐熱鋼 : SUH660 溶体化時効材、水素チャージ処理材

アルミニウム合金 : A6061-T6、同 Si 増量材(A6061HS)

チタン・チタン合金 : 純チタン 焼鈍材、水素チャージ処理材

Ti-6Al-4V 焼鈍材、水素チャージ処理材

Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo β -C 焼鈍材、水素チャージ処理材

これらの中から、特に 70MPa 機器の例示基準策定のために行った、SUS316L 溶体化処理材、A6061-T6、A6061HS、比較材の SUS304L 溶体化処理材、SUS316L に替わる水素用材料として期待される低 Ni 省 Mo 鋼 (STH1:15Cr-9Mn-6Ni-2Cu 鋼) の疲労試験結果を以下に示す。

図 III 2.3(2)1-2 は SUS316L 厚板 (溶体化処理材) の疲労亀裂伝播特性である。ロット A は大気中、45MPa および 90MPa 高压水素中でほとんど差はなく、水素による疲労亀裂伝播速度の加速は認められないが、ロット B では 90MPa 高压水素中で、わずかながら疲労亀裂伝播速度が速くなっている。これは、厚板のような厚肉のステンレス鋼の中心部に存在する Ni のミクロ負偏析の影響によるものである。その低下率は僅かであり、実用上特に問題となるようなものではないが、正確な SUS316L (17Cr-12Ni-2Mo 鋼) の特性を評価するには、偏析の小さい部分から試験片を採取することが重要である。

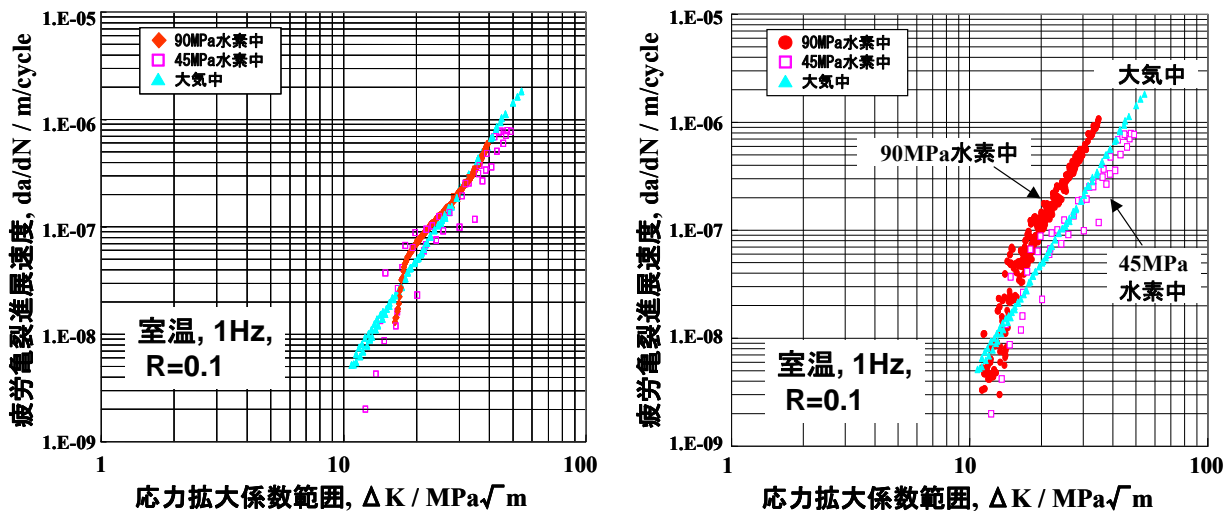


図 III 2.3(2)1-2 SUS316L 鋼厚板 (溶体化処理材) の室温における疲労亀裂伝播特性。左は同一厚板 (ロット A) から採取した試験片を用いた試験結果。右の 90MPa 水素中データは別ロット (ロット B) から採取した試験片を用いた試験結果

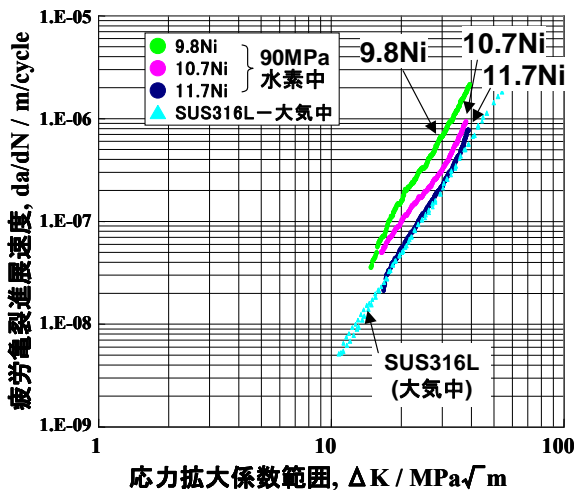
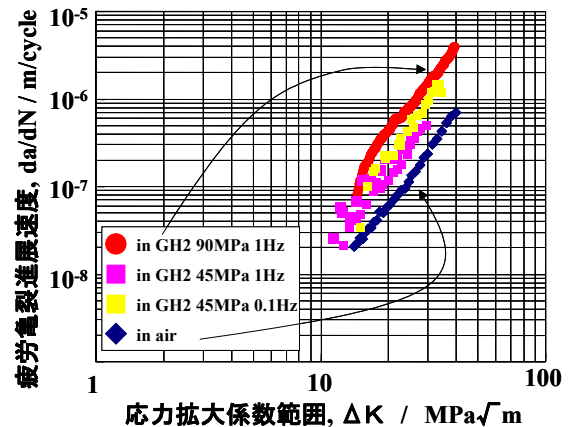


図 III 2.3(2)1-3 Mo=2%、Cr=17% に固定し、Ni 含有量を 9.8~11.7% の範囲で変化させた SUS316 系ラボ製造鋼 (溶体化処理材) の室温、90MPa 高压水素中における疲労亀裂伝播特性

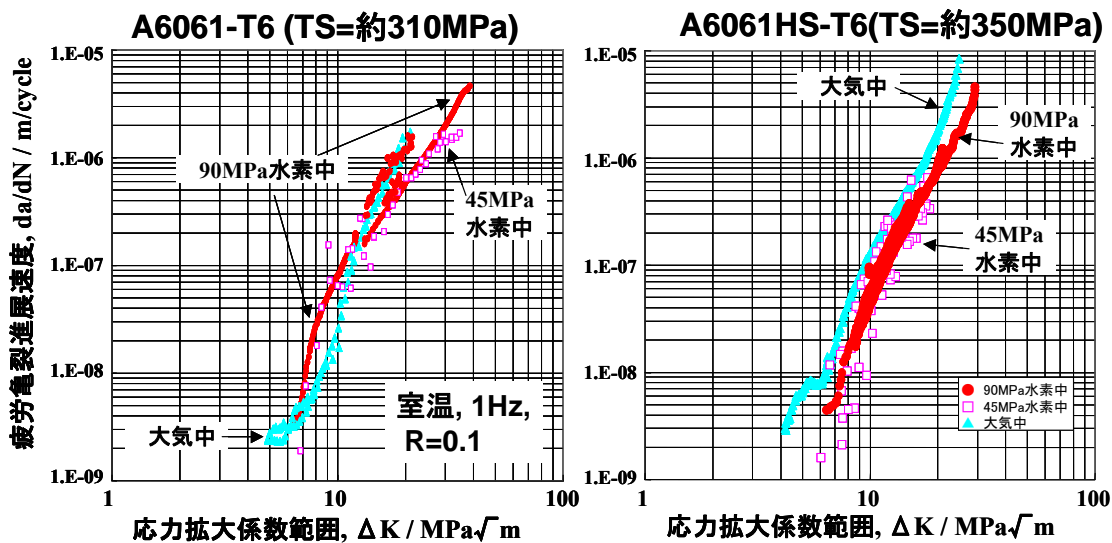
このマイクロ偏析の影響は、図Ⅲ 2.3(2)1-3 に示した Ni 量を 9.8～11.7%の範囲で変化させた SUS316 系材料の疲労亀裂伝播特性に明瞭に示されている。すなわち、Ni 量が SUS316L の下限値の 12%に近い 11.7Ni 材の疲労亀裂伝播速度は SUS316L の大気中のそれに近いが、Ni 量が減るに従って亀裂伝播速度は速くなっている。

図Ⅲ 2.3(2)1-4 は SUS304L 鋼厚板溶体化処理材の疲労亀裂伝播特性である。この材料は高圧水素中で明瞭な脆化を示す材料であり、疲労亀裂伝播速度も高圧水素中で加速している。また、僅かではあるが、45MPa 水素中のデータから、試験周波数の影響も伺える。

図Ⅲ 2.3(2)1-5 は、A6061-T6 (引張強さ=約 310MPa) および A6061 の Si 量を高め高強度化した A6061HS (調質は同じく T6、引張強さ=約 350MPa) の室温における疲労亀裂伝播特性である。ステンレス鋼に比べややばらつきが大きい、両アルミニウム合金とも 90MPa の高圧水素中で、疲労亀裂伝播速度の加速は認められない。また両材料は、S-N 疲労試験にも供したが、高圧水素中で疲労寿命特性の低下は認められなかった。



図Ⅲ 2.3(2)1-4 SUS304L 鋼厚板 (溶体化処理材) の室温、高圧水素ガス中における疲労亀裂伝播特性 (R=0.1)

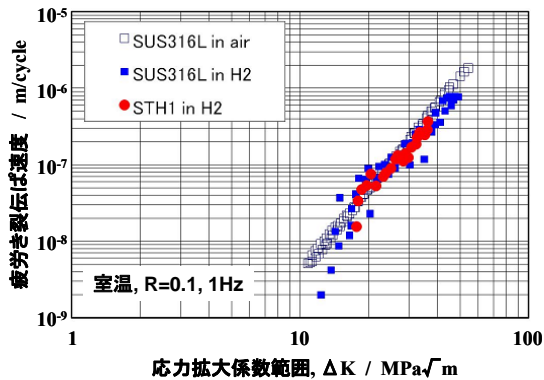


図Ⅲ 2.3(2)1-5 A6061-T6 (左)および Si を増量した A6061HS(右)の室温、高圧水素ガス中における疲労亀裂伝播特性

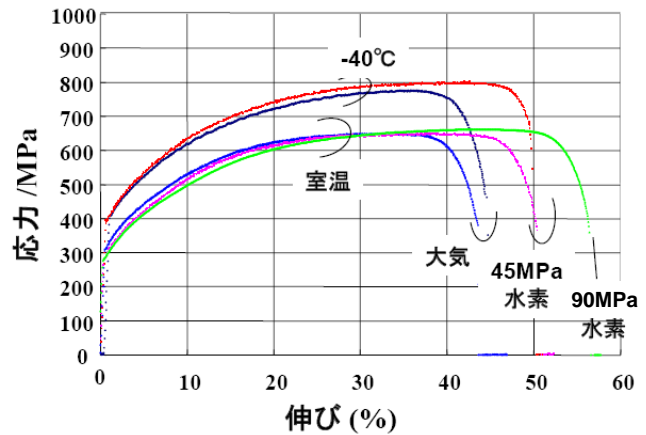
図Ⅲ 2.3(2)1-6 は、Ni 含有量が SUS316L の半分の 6%であるにもかかわらず高圧水素ガス雰囲気下でも脆化をほとんど示さないことから、低コスト・省資源の観点から SUS316L に替わる新しい水素用ステンレス鋼として期待されている STH1 鋼の室温、45MPa 水素ガス中における疲労亀裂伝播特性である。SUS316L の大気中および 45MPa 水素中の疲労亀裂伝播速度と同等であり、45MPa までの圧力下では、水素による疲労亀裂伝播速度の加速は無いことが確認された。

なお、この STH1 は SUS316L と同等の強度特性を有しているが、高圧水素配管等では、よ

り高強度の材料が求められている。そこで、より高強度の SHT2 が設計されている。これは STH1 の窒素含有量を 0.15~0.2% に高めた材料で、260MPa 程度であった STH1 の 0.2% 耐力が約 400MPa にまで向上している。図Ⅲ 2.3(2)1-7 は SHT2 の室温および-40℃ の高圧水素ガス中における応力-曲線である。室温はもとより-40℃ の高圧水素ガス環境下でも脆化することなく高い延性を示している。なお、高圧ガス中の方が高延性を示したのは静水圧の影響である。



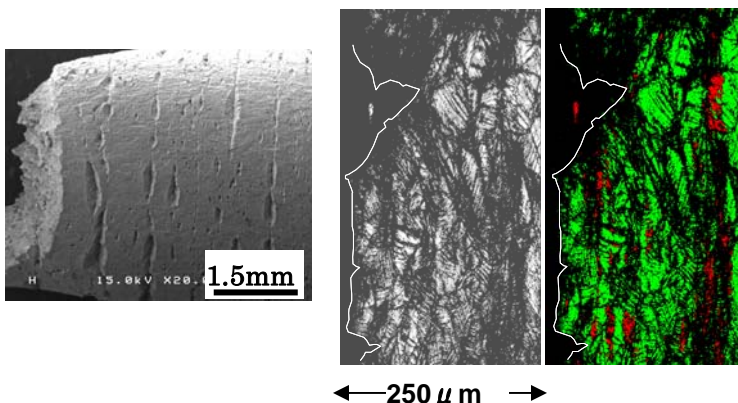
図Ⅲ 2.3(2)1-6 STH1 鋼および SUS316L 鋼（溶体化処理材）の室温、高圧水素ガス中における疲労亀裂伝播特性



図Ⅲ 2.3(2)1-7 SHT2 鋼の室温および-40℃、大気中及び高圧水素中における応力-伸び曲線

(3) γ 系ステンレス鋼の水素脆化影響因子の解析

(2)で紹介したように、SUS316L は偏析がなければ水素中で脆化や疲労特性の低下は示さないが、SUS304L など加工誘起マルテンサイト変態する材料は一般に高圧水素中で脆化し、疲労特性も低下する。今後、材料コストの低減や材料選択の自由度拡大の観点から、水素脆化しても脆化の程度が軽微であれば水素機器への使用が許容される可能性があるが、そのためには、脆化の程度・条件とともに脆化を引き起こす影響因子を明確化しておく必要がある。このような観点から、SUS304L を中心に、水素脆化影響因子の解析を行った。

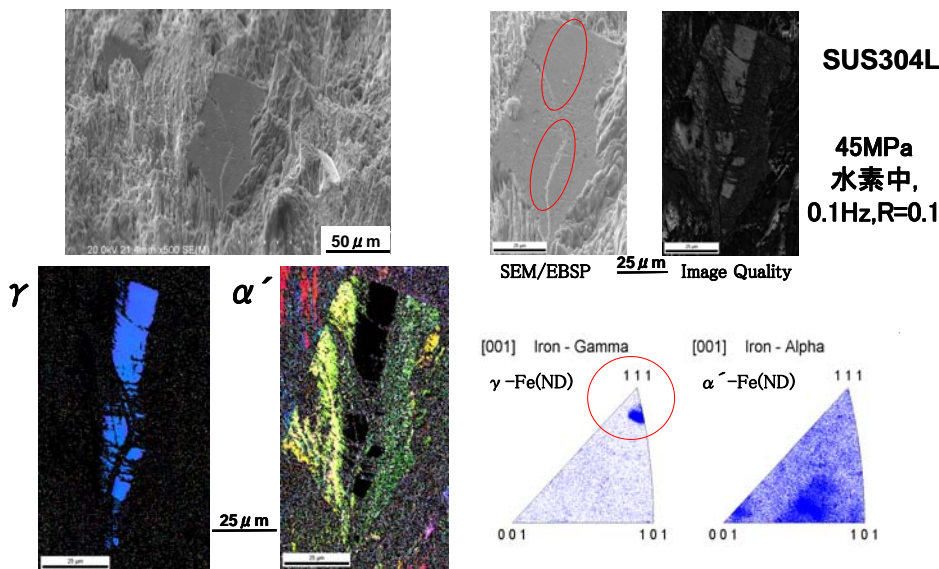


図Ⅲ 2.3(2)1-8 85℃、45MPa 水素中で引張破断させた SUS304L の破断部近傍側面 SEM 写真(左)および断面に対して実施した EBSD 解析結果 (中 Image Quality Map, 右 Phase Map — 赤; α' マルテンサイト相、緑; γ 相 CI>0.1)。

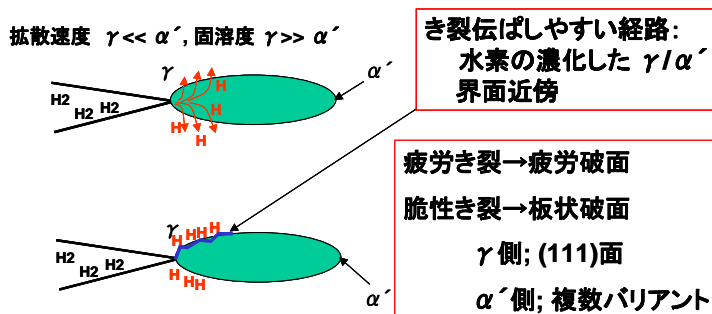
図Ⅲ 2.3(2)1-8 は、SUS304L を 85℃、45MPa の水素ガス中で引張試験した破断試験片の破断部近傍断面に対して行った EBSD (Electron Back Scattering Diffraction; 電子線後方散乱回折) 解析結果である。この試験環境でこの材料は顕著な脆化を示し、試験片側面には割れが多数生成している。しかし、割れ近傍には明瞭な α' 加工誘起マルテンサイト相は認められず、 α' 相が生成していたとしても脆化せず大きな塑性加工を受けている (図Ⅲ 2.3(2)1-8(右))

図 割れ近傍の黒色部＝塑性加工量の大きい部分)。すなわち、従来説の「 α' 相が生成することで脆化する」という機構で割れが発生しているのではないことを示している。

図Ⅲ 2.3(2)1-9 は、SUS304L を室温、45MPa 水素中で疲労亀裂伝播試験した試料の破面に生じた平板状脆性破面の一例である。多数の同様の破面に対して EDS 解析した結果、いずれも破面は母相 γ 相の $\{111\}$ 面で、一部 α' 相も混在する破面であった。すなわち、疲労亀裂は γ 相と α' 相の界面近傍を伝播していることが明らかとなった。



このような水素ガス中特有の平板状破面は、図Ⅲ 2.3(2)1-10 に示す機構により生じていると推定される。まず亀裂先端部の歪集中で α' 相が生成する。水素がここに外部から侵入すると固溶度の大きい γ 相に向かって拡散する。しかし、 γ 相中の拡散速度は α' 相中より極端に遅いため、 γ/α' 界面近傍に水素が濃化しこの部分で脆化がおこる。 $\gamma \{111\}$ 面は、 ϵ 相が生成し、この (0001) 面に沿って割れた後、除荷されて γ 相に逆変態したことで生じた可能性が考えられる ($\epsilon (0001)$ と $\gamma \{111\}$ は等価面)。もしこのような機構で脆化しているのであれば、 α' マルテンサイト変態を抑制するのではなく、 ϵ 相の生成を抑制する (あるいは積層欠陥エネルギーを制御する) ことで脆化を抑制できる可能性があり、この知見は、将来の新しい水素用材料開発の重要なシーズとして活用が期待される。



図Ⅲ 2.3(2)1-10 γ/α' マルテンサイト界面近傍に生ずる平板状脆性破面の形成機構の模式図

その他、疲労周波数の影響についても SUS304L (図Ⅲ 2.3(2)1-4) のほか、水素チャージした SUS316L に対し極低周波数試験を行い、0.02Hz 程度まで疲労亀裂伝播速度の加速は認められないことを明らかにした。

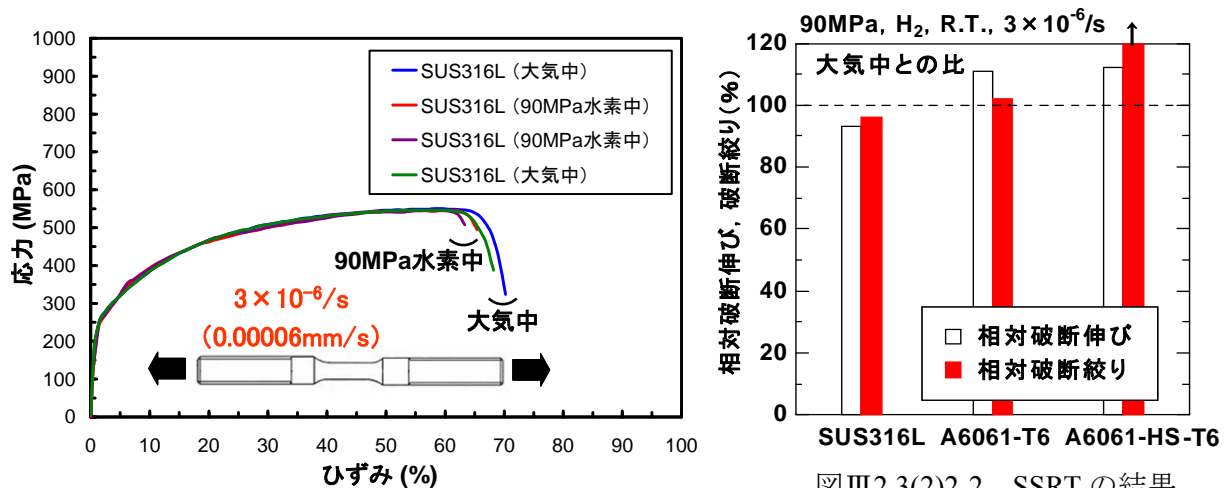
2.3(2)2 高圧水素配管材料の研究開発（住友金属工業株式会社）

本研究では、高圧水素ガス中の低ひずみ速度引張特性と脆化機構評価、高圧水素ガス中における内外圧疲労特性評価、ステンレス鋼管材の高強度化手法の検討などを推進した。

(1) 高圧水素ガス中の低ひずみ速度引張特性と脆化機構評価

最大 90MPa の水素ガス環境下における低ひずみ速度引張試験(Slow Strain Rate Test, SSRT) 技術を確立し、この試験方法により 45MPa 水素中の各種材料の機械的特性に関するデータを蓄積した。アルミニウム合金 A6061-T6、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L・SUS304L に加えて、析出強化型ステンレス鋼 A286(SUH660)、マルテンサイト系ステンレス鋼 SUS420、低合金鋼 SCM435 等を評価した。A6061-T6、SUS316L、A286 では顕著な脆化は認められなかったが、SUS304L、SUS420、SCM435 では大気中に比べて破断伸びや絞りが大きく低下した。

SUS316L、アルミニウム合金(A6061-T6、A6061-HS-T6)、A286 については 90MPa 水素中のデータを取得した (図Ⅲ.2.3(2)2-1、図Ⅲ.2.3(2)2-2)。アルミニウム合金および SUH660 については大気中の値に対して引張強度、破断伸び、絞りの低下は認められなかったが、SUS316L については水素により僅かに破断伸びならびに絞りが低下し、偏析の影響の可能性が考えられた。

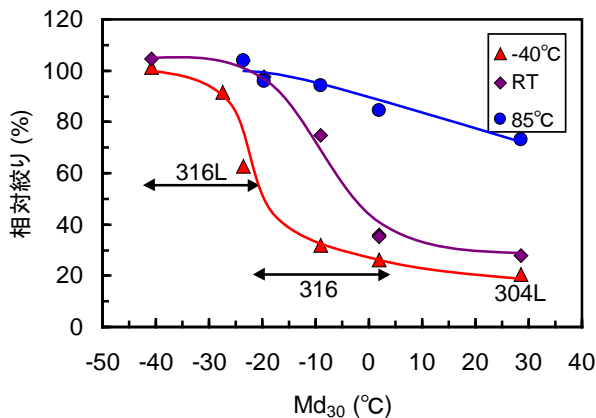


図Ⅲ.2.3(2)2-1 SSRTにおける応力-ひずみ曲線の例

図Ⅲ.2.3(2)2-2 SSRTの結果
(90MPa 水素環境)

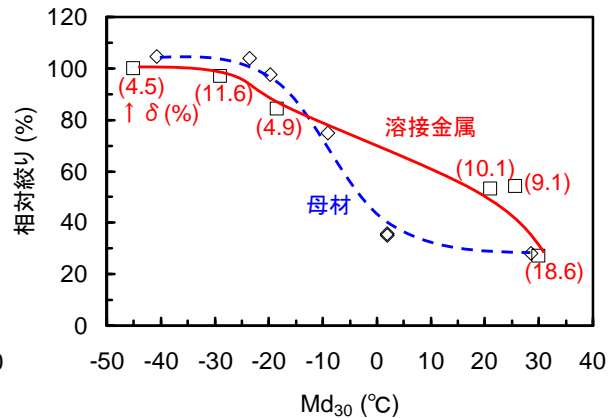
SUS316、316L系ステンレス鋼について、水素中で使用できる成分範囲の明確化とその拡大の検討を行うため、水素環境脆化特性に及ぼす化学組成の影響について検討した。SUS316、316L系で成分(主にNi量)を変化させた材料のSSRTを-40℃、室温、85℃の45MPa水素ガス中で実施した。各試験温度での相対絞りと成分から決まるMd₃₀値の関係(図Ⅲ.2.3(2)2-3)を用いて、脆化の起こらない成分範囲を決定できる。SUS316、316L系ステンレス鋼の水素環境脆化は加工誘起マルテンサイト(α')相の生成が主原因と考えられ、脆化の防止には-40℃ではMd₃₀を-40以下、室温(RT)~85℃の環境ではMd₃₀を-20以下の組成にする必要がある。また、同様の検討を成分範囲とδフェライト量を変化させたSUS316Lおよび308L系溶接金属についても実施した。この結果、溶接金属中に生成したδフェライト相は今回の検討範囲内では脆化特性に影響せず、溶接金属の脆化特性は母材の場合と同様にα'相の生成で決定されてい

ると推定された (図Ⅲ2.3(2)2-4)。



図Ⅲ2.3(2)2-3 水素環境脆化に及ぼす
Md₃₀ 値の影響
(45MPa 水素環境)

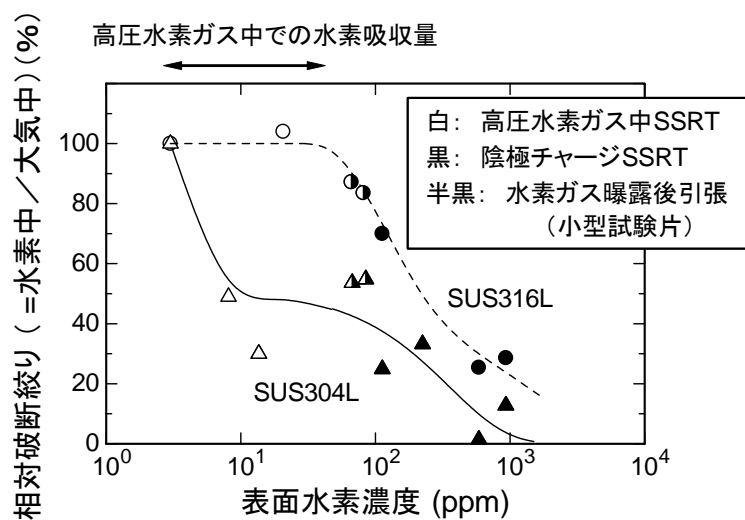
Md₃₀=413-462(C+N)-9.2Si-8.1Mn
-13.7Cr-9.5Ni-15.5Mo



図Ⅲ2.3(2)2-4 溶接金属の水素環境脆化
に及ぼす Md₃₀ 値、 δ フェライトの影響
(45MPa 水素環境)

Md₃₀=413-462(C+N)-9.2Si-8.1Mn
-13.7Cr-9.5Ni-15.5Mo

実機器で長時間使用した場合には、材料試験時よりも多量の水素が吸収される可能性があり、実機器の安全性を評価するためには、脆化が生じる限界水素濃度を把握する必要がある。SUS316L、304L について、高圧水素ガス中 SSRT、ガス中よりも多量に水素が吸収される陰極チャージ SSRT、小型試験片(厚さ 0.3mm、平行部 1mm)を用いた高圧水素ガス曝露後引張試験を行い、表面水素濃度と相対破断絞りの関係を整理した(図Ⅲ2.3(2)2-5)。SUS304L は 10ppm 以下の水素濃度で脆化を生じるのに対して、SUS316L が脆化を生じる限界水素濃度は 100ppm 程度と推定され、限界水素濃度の観点からも SUS316L の方が水素脆化に対して余裕度の大きい材料であることを確認した。



図Ⅲ2.3(2)2-5 相対絞りに及ぼす水素濃度の影響

水素侵入に及ぼす環境・材料因子の影響を評価するため、オーステナイト系またはフェライト系ステンレス鋼を用いて、酸化皮膜が水素侵入に及ぼす影響について検討した。無ひずみでは Al_2O_3 皮膜、不動皮膜、 Cr_2O_3 皮膜ともに水素侵入抑制効果を有したが、ひずみ付与により酸化皮膜は破壊され、水素吸収量は増大した。さらに、実使用状態に近い応力負荷条件下での水素透過量を測定しうる試験装置を導入し、SUS316L、低合金鋼について水素透過係数の測定を行い、水素透過係数は温度および水素圧の上昇に伴って大きくなることを確認した。

関連業界から低コスト材、機器の軽量化のための高強度材を使用したいとの要望があることを考慮し、低コスト材として低 Ni 省 Mo 高 Mn 新ステンレス鋼、高強度材として SUS316L 冷間加工材、析出強化型ステンレス鋼 A286(SUH660)、SUS316 あるいは SUS310 をベースに N による固溶強化+冷間加工、VN による析出強化で高強度化した材料などを供試材とし、室温の 90MPa 水素ガス中において、 $3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ のひずみ速度で SSRT を実施した。いずれの鋼種も水素による破断伸び、絞り、引張強さの顕著な低下は認められなかった。

(2) 高圧水素ガス中における内外圧疲労特性評価

最大 88MPa の高圧水素ガスを用い、鋼管状試験片の圧力変動による疲労試験(外圧、内圧疲労試験)を実施した。この試験方法により、ステンレス鋼の水素中の疲労特性に及ぼす各種因子(サイクルタイム、試験温度、冷間加工、溶接施工、材料の強化手法など)の影響を調査した。

長周期の内圧疲労試験を行い、SUS304、SUS316L ともサイクルタイムの増加に伴い疲労寿命は低下するが、所定の時間以降は飽和する傾向が確認され、装置設計上重要な知見が得られた(図 III.2.3(2)2-6)。

高強度材の外圧疲労試験を初期き裂材、平滑材を用いて実施した。供試材は析出強化型ステンレス鋼 A286(SUH660)、SUS310 をベースに VN 析出強化により高強度化した材料などであり、試験結果の例を図 III.2.3(2)2-7 に示す。

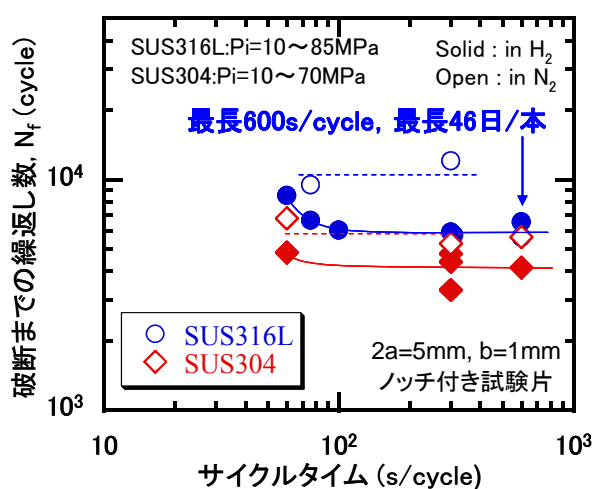


図 III.2.3(2)2-6 SUS316L、SUS304 の水素中疲労寿命に及ぼすサイクルタイムの影響

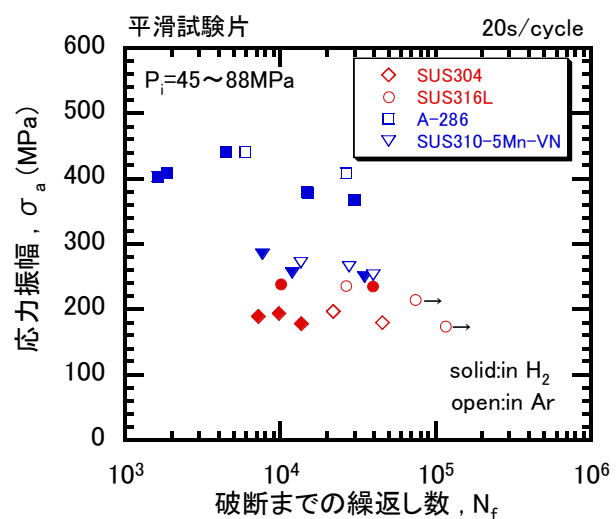
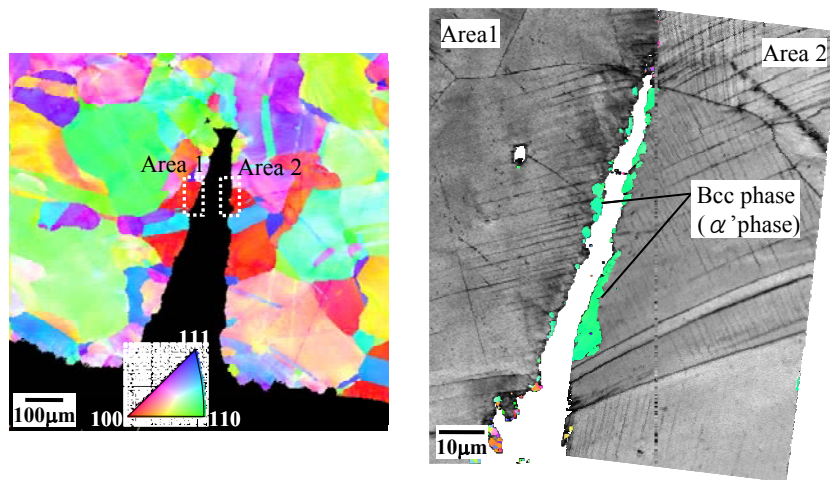


図 III.2.3(2)2-7 高強度材の水素中疲労寿命

-40℃、室温での内圧疲労試験を SUS316L、304 について実施した。SUS316L については試験温度の影響は小さく、水素中と窒素中の寿命差も小さい。SUS304 については水素中、窒素中のいずれでも-40℃の方が室温よりやや低寿命となる傾向が認められた。

水素中の疲労試験で発生した加工誘起マルテンサイト(α')相とき裂との相関を明らかにするため、EBSD(Electron Back Scatter Diffraction Pattern)法により疲労試験途中止め材のき裂先端を観察した(図Ⅲ.2.3(2)2-8)。き裂先端近傍には加工誘起マルテンサイト相の生成が確認され、加工誘起マルテンサイト相はき裂の片側に多く存在していることが確認された。マルテンサイト相とオーステナイト相の界面をき裂が進展する理由には、低固溶度で水素拡散速度が高いマルテンサイト相を通して供給される水素が高固溶度で水素拡散速度が低いオーステナイト相との界面で過飽和状態になり、その界面を優先的にき裂が進展する機構が考えられる。



図Ⅲ.2.3(2)2-8 SUS304 水素中疲労き裂進展経路の EBSD 観察

(3) ステンレス鋼管材の高強度化手法の検討

水素ガス高圧化に対応して高強度鋼が使用されることを想定し、ステンレス鋼の高強度化手法について検討した。固溶強化、冷間加工、析出強化(窒化物、金属間化合物)などで強化したステンレス鋼や比較鋼として低合金鋼 SCM435 の水素中 SSRT、疲労試験を行い、これらの強化手法が水素ガス中の強度特性に及ぼす影響を評価するとともに、破面・組織観察によって水素中での脆化や疲労特性劣化の原因を調査した。

実鋼管での材料特性データを蓄積するため、低 Ni 省 Mo 高 Mn 新ステンレス鋼、A286(SUH660)、SUS316L 等について実鋼管を製造した(図Ⅲ.2.3(2)2-9)。水素環境脆化特性を SSRT や内外圧疲労試験により評価し、水素による劣化は無いことを確認した。



図Ⅲ.2.3(2)2-9 鋼管材の外観
(34.0 φ × 6.5t)

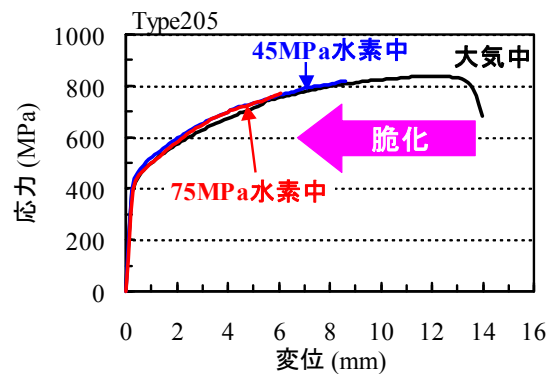
2.3(2)3 高圧水素バルブ・継手用材料の研究開発（愛知製鋼株式会社）

高圧水素ガス環境下のバルブ・継手用材料としての利用が期待される素材として、ステンレス鋼を中心に上げ、高圧水素ガス環境下における引張特性を調査するとともに、長期間の使用を想定し、高圧水素ガス環境に長時間曝されたステンレス鋼等の水素吸収特性および引張特性を調査した。

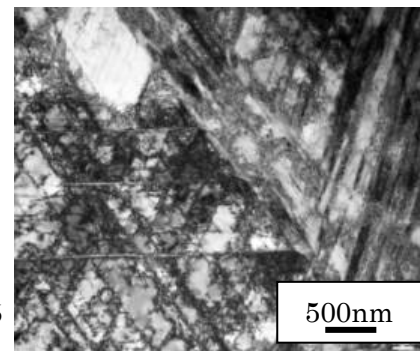
(1) バルブ・継手用材料の高圧水素ガス環境における引張特性

車載用高圧水素ガスタンクに接続されるバルブ・継手用材料としての利用が期待されるステンレス鋼および銅合金を 45MPa および 70MPa 高圧水素ガス環境下で引張試験に供し、引張特性に及ぼす高圧水素ガス環境の影響を調査した。その結果、C3771 銅合金は、水素ガス環境脆化を示さないこと、SUS630 析出硬化型ステンレス鋼は著しい水素ガス環境脆化を示すことが明らかとなった。また、ステンレス鋼では、従来の知見どおり、SUS304<SUS316<SUS316L の順で水素ガス環境脆化が低減されることが確認された。

高耐力を有する Type205 オーステナイト系ステンレス鋼および SUS329J4L 二相系ステンレス鋼と汎用の SUS316L および SUS304 オーステナイト系ステンレス鋼および

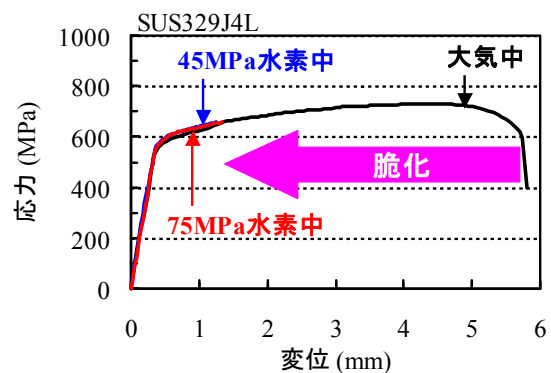


図Ⅲ 2.3(2)3-1 Type205 の大気中および高圧水素中の引張特性



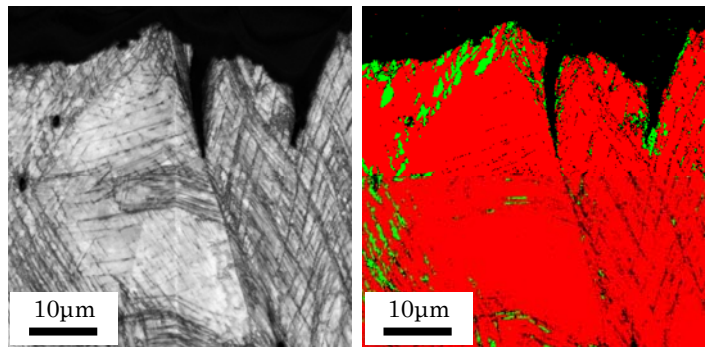
図Ⅲ 2.3(2)3-2 Type205 の30%引張加工材の内部組織

C3771 銅合金を供試材として、高圧水素ガス環境における引張特性を調査した。その結果、SUS316L および C3771 は、高圧水素ガス環境においても、大気環境と同様な引張特性を示すことが確認された。一方、Type205(17Cr-1.5Ni-15Mn-0.35N)、SUS329J4L(25Cr-6Ni-3Mo-0.2N)、SUS304 は、顕著な水素ガス環境脆化を示すことが確認された。破面観察と各種分析の結果から、Type205 の水素ガス環境脆化は、プラナーな転位すべりに起因するすべり面分離によるものと推察された (図Ⅲ 2.3(2)3-1、2)。一方、SUS329J4L の水素ガス環境脆化は、フェライト相の水素ガス脆化に起因するものと推察された (図Ⅲ 2.3(2)3-3)。また、SUS304 の水素ガス環境脆化は、加工誘起マルテンサイト相の生成のみでなく、プラナーなすべり帯の形成など他の要因にも起因している可能性が示唆された (図Ⅲ 2.3(2)3-4)。



図Ⅲ 2.3(2)3-3 SUS329J4L の大気中および高圧水素中の引張特性

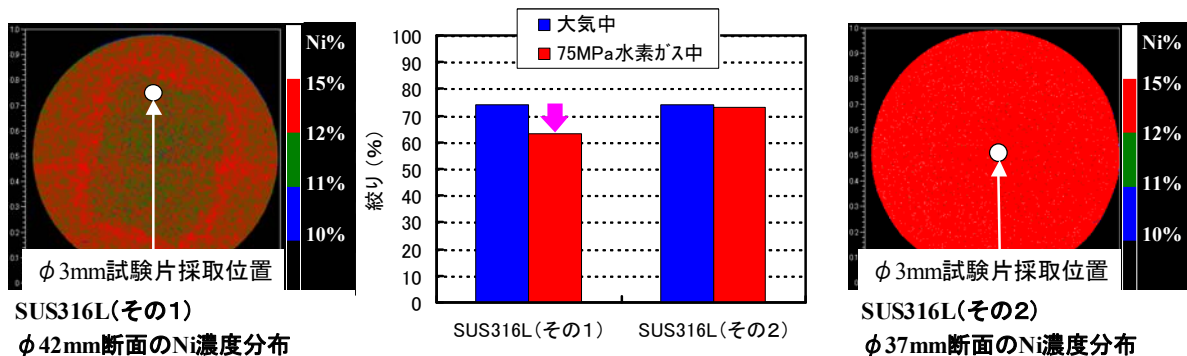
SUS316L を供試材として、高圧水素ガス環境における引張特性に及ぼす表面仕上げの影響を調査した。SUS316L の高圧水素ガス環境における引張試験の絞りは、試験片の表面仕上げを平滑にするほど、大気環境や高圧アルゴンガス環境と同様の高い値を示した。すなわち、試験片の表面仕上げを粗くするほど水素ガスの影響が現われることが確認された。



イメージオリティ像 相マップ(赤:FCC, 緑:BCC)

図Ⅲ 2.3(2)3-4 45MPa 水素ガス中で引張破断させた SUS304 試験片の破断面直下の EBSD (Electron Back Scattering Diffraction : 電子線後方散乱回折) 分析結果

これまでに得られた試験結果から、“SUS316L でも水素ガス環境脆化示す場合がある”と判断されることから、この原因について調査した。その結果、それらの水素ガス環境脆化が、素材断面内の Ni 濃度が 12.0%を下回るような負偏析に起因していることが推察された(図Ⅲ 2.3(2)3-5)。このことから、偏析が小さく、Ni 濃度が素材断面内で均一かつ断面内の Ni 濃度が 12.0%を上回

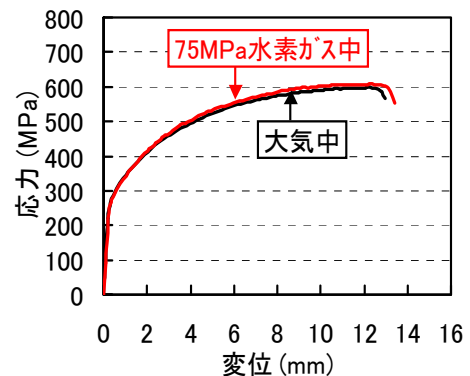


図Ⅲ 2.3(2)3-5 12.09%Ni の SUS316L(その 1)と 13.20%Ni の SUS316L(その 2)の丸棒断面における EPMA (Electron Probe MicroAnalyser : 電子線マイクロアナライザ) 分析結果およびそれらの大気、水素ガス中引張試験による絞りの比較

る SUS316L を高圧水素ガス用途に適用することが好ましいと考えられる。

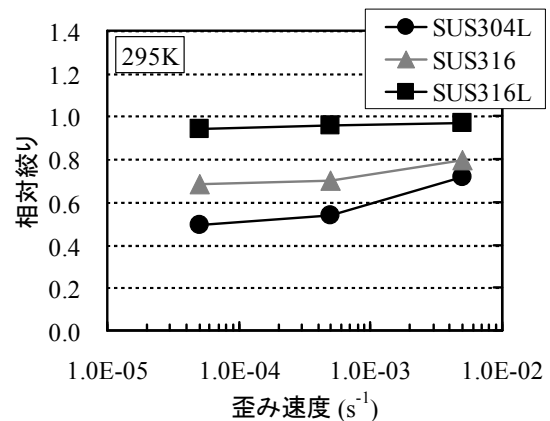
SUS316L 系の加工性向上 (加工コストの低減) を目的に、SUS316L の高圧水素ガス環境の引張特性に及ぼす S 添加の影響を調査することにより、切削性向上を目的とした S 添加 SUS316L の高圧水素ガス環境への適用の可能性を検討した。その結果、SUS316L に 0.3%S 添加した SUS316L 供試材においても、水素ガス環境脆化はほとんど認められないことが明らかとなった(図Ⅲ 2.3(2)3-6)。また、SUS316L への S 添加量の増加に伴い、切削性の向上が顕著であることも明らかとなった。

(2) 高圧水素ガス環境に長時間曝されたステンレス鋼等の引張特性



図Ⅲ 2.3(2)3-6 0.3%S 添加 SUS316L の水素ガス中と大気中

高圧水素ガス環境に長時間曝されたステンレス鋼の水素吸収と引張特性について調査した。その結果、高圧水素ガス曝露による絞りの低下度合いは、素材種類、ひずみ速度、試験温度の影響を受けることが明らかとなった（図Ⅲ 2.3(2)3-7）。具体的には、今回の試験条件の範囲内においては、素材種類では、SUS316L<SUS316<SUS304Lの順で高圧水素ガス曝露による絞りの低下度合いが大きくなった。また、ひずみ速度が小さいほど、高圧水素ガス曝露による絞りの低下度合いは大きくなった。さらに、試験温度では、253K~233K付近で最も高圧水素ガス曝露による絞りの低下度合いが大きくなるものの、それより高温および低温側では、その絞りの低下度合いは小さくなった。



図Ⅲ 2.3(2)3-7 温度 358K の 85MPa 水素中に 1000 時間曝された引張試験片の相対絞り（暴露材の絞り／未暴露材の絞り）に及ぼす素材種類、ひずみ速度の影響

これら一連の高圧水素ガス曝露材の引張特性は、水素吸収量、加工に伴うマルテンサイト変態量、水素の拡散係数の視点から整理できると考えられる。

車載用高圧水素ガスタンクに接続されるバルブ・継手用材料としての利用が期待されるステンレス鋼および銅合金を取り上げ、高圧水素ガス環境に長時間曝された、それら材料の水素吸収と引張特性について調査した。その結果、高圧水素ガス曝露による絞りの低下度合いは、素材種類、試験温度の影響を受けることが明らかとなった。具体的には、今回の試験条件の範囲内においては、素材種類、曝露圧力によらず、試験温度が低いほうが、高圧水素ガス曝露による絞りの低下度合いが大きくなった。ただし、曝露圧力によらず、C3771 の試験温度 296K および試験温度 233K、SUS316L の試験温度 296K においては、その絞りの低下度合いが小さいことを確認した。一方、それ以外の素材種類、試験温度、曝露圧力においては、高圧水素ガス曝露による絞り低下が顕著であり、この絞りの低下度合いは、C3771<SUS316L<SUS316<SUS304 の順で大きくなることを確認した。

SUS316 系ステンレス鋼として Ni 濃度と Cr 濃度を変化させた 9 種類の素材を製作し、高圧水素ガス環境に長時間曝された、それら素材の水素吸収と引張特性について調査した。その結果、高圧水素ガス曝露による絞りの低下度合いは、素材種類、試験温度、曝露圧力の影響を受けることが明らかとなった。具体的には、今回の試験条件の範囲内においては、オーステナイト安定度が低い素材ほど、高圧水素ガス曝露による絞りの低下度合いは大きくなり、また、試験温度が低いほど、高圧水素ガス曝露による絞りの低下度合いは大きくなり、さらに、曝露圧力が高いほど、高圧水素ガス曝露による絞りの低下度合いは大きくなることを確認した。

2.3(2)4 液体水素用構造材料の研究開発（新日本製鐵株式會社）

燃料電池自動車を中心とした水素エネルギー社会では、車載水素燃料タンクに高压水素ガスを搭載する方法が主として検討されており、水素を供給する水素ステーションも高压水素ガスの供給施設として安全性の検討が行われている。しかし大量の水素の輸送・貯蔵を行う場合、液体水素は優れたエネルギーの輸送・貯蔵媒体であり、特に再生可能エネルギーを一次エネルギーとして活用した水素の製造、輸送、貯蔵を考えると、この極低温環境に十分耐性のある材料の抽出・開発を行っておくことは人類にとって極めて重要な課題である。

このような観点から、古くは WE-NET プロジェクト以来進めてきた液体水素中における材料評価を本プロジェクトでも実施し、最汎用ステンレス鋼 4 鋼種 (SUS304、304L、316、316L) に加え、SUS310S、SUS305、STH1 鋼などの新しい材料について、液体水素中を含む極低温環境下における特性評価を実施し、データを蓄積した。

なお、本研究結果は平成 8 年度に WE-NET プロジェクトで導入した液体水素雰囲気下材料試験装置を駆使して行ったものである。また、国産ロケットは主に液体水素を燃料として使用しており、その貯蔵や輸送など本プロジェクトと共通の課題を有していることから、JAXA(宇宙航空研究開発機構)や NIMS(物質材料研究機構)が中心となって組織・運営されている「宇宙関連材料強度特性データ整備委員会」等の関連委員会にも参加し、情報交換・相互協力を推進した。

(1) 最汎用ステンレス鋼 (SUS304、304L、316、316L) 溶接金属の液体水素中を含む極低温環境下における材料特性評価

5mm 厚の上記 4 鋼種中板を TIG (3 パス) および MIG 溶接 (2 パス) し、溶接継手引張試験片(2mmt)および曲げ疲労試験片(2mmt)を切り出し、室温大気中と液体水素中 (-253℃) にて引張試験および曲げ疲労試験 (両振り R=-1) を実施した。その結果、融合不良などの溶接欠陥部を除いた健全部は、低温脆化することなく十分高い 0.2%耐力、引張強度、伸びを示した。また、0.2%耐力の 90%の最大応力を付与しても 10^6 回の繰り返し数では疲労破壊しないことを確認した。γ系ステンレス鋼溶接部は、溶接熱サイクルの影響が大きくなると延縮性が低下する可能性があるが、2~3 パス溶接ではそのような傾向は現れず、液体水素容器、配管として好適な材料であることが確認できた。

(2) その他 γ系ステンレス鋼 (SUS310S、SUS305、STH1) 母材の液体水素中を含む極低温環境下における材料特性評価

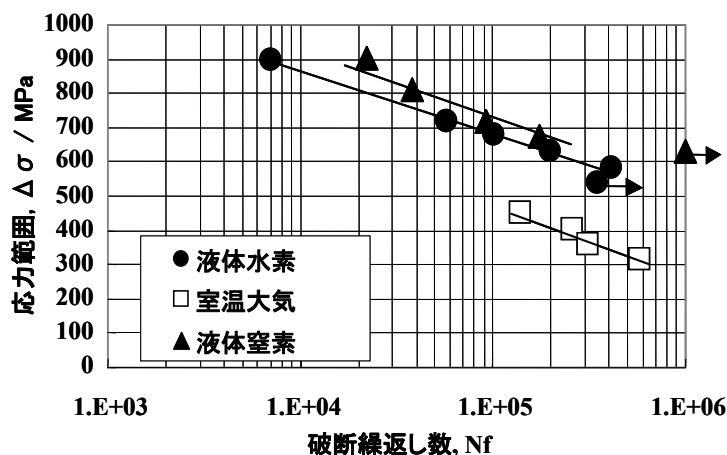
極低温環境用としては標準的な材料ではないが、安定 γ系ステンレス鋼の SUS310S、Mo を含まず SUS316L よりも安価な SUS305、低 Ni 省 Mo で高压水素用材料として注目される STH1 鋼 (Fe-15Cr-9Mn-6Ni-2Cu) についても、液体水素中を含む極低温環境下で引張試験を行い使用性能を評価した。

表 III 2.3(2)4-1 は STH1 鋼の試験結果である。SUS304L や 316L などの標準材とほぼ同等の強度特性を示しており、かつ各環境下でも十分な延性を示しており、これら標準材料の代替として十分使用できることを示した。SUS305、SUS310S も同様に優れた引張特性を示した。

	試験片番号	0.2%PS(MPa)	TS(MPa)	伸び(%)	絞り(%)
室温	L-1	280	618	74.0	79.1
室温	L-2	261	611	73.5	74.0
77K	L-5	501	1443	59.6	33.8
77K	L-6	487	1413	66.7	65.8
20K	L-3	591	1554	38.7	22.4
20K	L-4	595	1476	38.2	21.2
4K	L-7	599	1487	59.9	62.4
4K	L-8	625	1466	63.3	51.8

表Ⅲ 2.3(2)4-1 STH1 鋼の室温大気中、液体窒素中(77K)、液体水素中(20K)、液体 He 中(4K)における引張特性

STH1 鋼については、丸棒試験片を用いた軸力疲労試験（片振り R=0.1）も実施した。図Ⅲ 2.3(2)4-1 に示すように、室温、液体窒素中（77K、-196℃）、液体水素中（20K、-253℃）とも、繰返し数 10^6 回における疲労強度（最大応力=応力範囲/0.9）は、0.2%耐力を上回っており、SUS304 など他の標準ステンレス鋼同様、高い S-N 疲労特性を有していることが確認された。



図Ⅲ 2.3(2)4-1 STH1 鋼の室温大気中、液体窒素中(77K)および液体水素中(20K)における疲労試験結果 (S-N 線図)。R=0.1。

(3) 極低温環境下における材料の変形挙動シミュレーション技術の適用

液体水素中を含む極低温環境における変形挙動のシミュレーション技術の適用を、本手法の開発者の東大名誉教授柴田先生のご指導のもと実施し、SUS304L、316L、316LN、純チタンの液体水素中および 20K ヘリウムガス中の応力-歪み曲線を検討した。この方法は、変形中の発熱、熱伝導、冷媒への熱伝達（液体冷媒では沸騰状態も考慮）などを各種熱物性データを基に総合的に取り込み、低温域での応力-歪み曲線に特徴的なセレーション(応力-歪曲線上に現れる急激な応力変動の繰返し)を再現する目的で開発された手法である。

一例を紹介すると、直径 3、5、7mm の SUS304L 丸棒引張試験片を用いて、20K の He ガス中で引張試験を行った際の応力-歪み(変位)曲線および温度変化を計算したところ、極低温環境における基本物性値が不足しているなどの制約があり、完全に計算と実験の一致には至っていないが、急激な温度上昇/低下や、太径試験片では応力の上昇/低下（セレーション）が現れるなど、実験結果を再現することができ、20K の He ガス中では冷媒中への熱伝達が小さくその分試料中の熱伝導が大きくセレーションが発生しやすいことや試験片寸法（径）のセレーション発生に及ぼす影響など、一定の実験事実をシミュレーションにより説明することが可能となった。チタンでも同様のシミュレーションを行い、実験結果との対比から、その有効性を確認した。

なお、本技術確立の基盤となった極低温環境下評価試験とシミュレーション技術は、ICMC-2003 Best Structural Materials Paper を受賞した。

2.3(2)5 水素用非金属材料の基礎物性に関する研究開発（高压ガス保安協会）

平成 17 年度～19 年度は、例示基準に示された FRP（Fiber Reinforced Plastics）の安全率の根拠を検討し、見直しを行うために、既に導入した疲労試験機及びストレスラプチャー試験機（静的荷重を与えて破断までの時間を計測する、破断強度の時間依存性試験機）により、縦弾性率 230GPa 及び縦弾性率 295GPa 級炭素繊維の物性データを取得した。また、モデル容器による損傷き裂進展試験を行った。さらに、マトリックス材、シール材等の水素暴露、高温暴露、及び不活性ガス暴露試験等を行い、その後引張試験を実施することにより、水素の影響について評価した。

自動車業界から高温における CFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastics）の機械的特性データ取得の要望（水素の急速充てんに伴う上限温度の決定）から、85℃における CFRP の疲労特性データを取得した。追加試験の詳細内容としては、平成 17 年度の高温高压水素暴露試験により、マトリックス材についてはわずかであるが劣化の傾向を示す結果も見られており、マトリックス材の劣化の原因について調査するため、マトリックス材について 85℃での大気中暴露試験および常温常圧水素暴露試験を実施した。

平成 20 年度～平成 21 年度は、既に導入した疲労試験機及びストレスラプチャー試験機により、縦弾性率 230GPa 及び縦弾性率 295GPa 級炭素繊維の物性データを引続き取得し、得られたデータを評価した後、FRP 複合構造製圧力容器の技術基準検討機関に提供した。

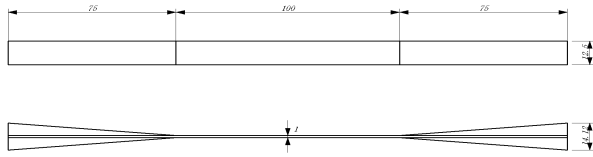
(1) 疲労試験

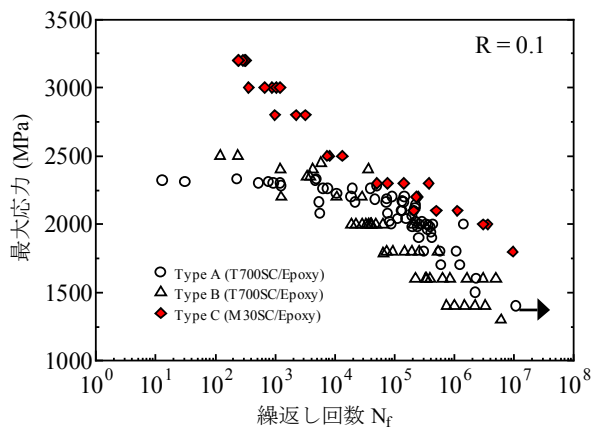
グリップをテーパ状にした CFRP のプリプレグ材（一方向に引き揃えた炭素繊維に樹脂を含浸させて半硬化させたシートを 10 枚重ねて硬化させた試験片）の疲労試験を実施した（表 III 2.3(2)5-1）。グリップをテーパ状にしたことにより今までグリップの中で起こっていた破断の影響が少なくなった。

高強度の CFRP の疲労は、炭素繊維本来の疲労特性と考えられるものの他、繊維と樹脂のはく離（または割れ）に伴うと考えられる疲労特性が存在することが明らかになった（図 III 2.3(2)5-1）。繊維と樹脂のはく離（または割れ）に伴う疲労が LBB（Leak Before Burst）の成立しない容器の疲労寿命を推定できると考える。また、繊維と樹脂のはく離（または割れ）が残存強度の低下につながることを確認した。

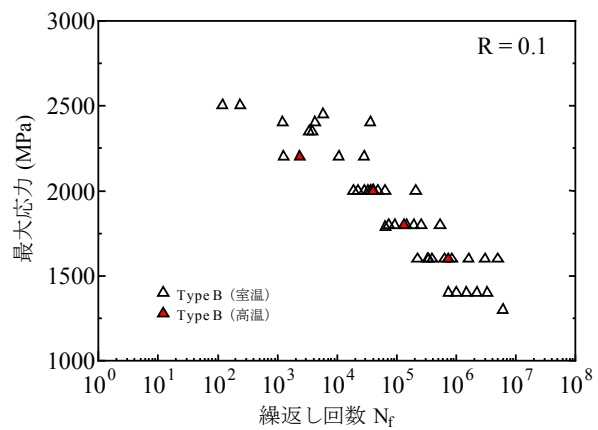
T_g （ガラス転移点、133℃）以下の温度 120℃において CFRP のプリプレグ材の引張試験及び疲労試験を実施した。高温引張試験では室温における引張強さの 15%の低下を示したが、疲労特性においては室温での試験結果と差が生じなかった（図 III 2.3(2)5-2）。

表Ⅲ 2.3(2)5-1 疲労試験片・疲労試験条件

試験方法	一軸、引張-引張
試験機	Servohydraulic, 50kN
荷重条件	荷重制御、軸荷重片振り (R=0.1) 試験波形：サイン波
試験温度	室温、大気中
試験速度	2Hz
試験片材質	CFRP
試験片形状	



図Ⅲ 2.3(2)5-1 疲労試験結果



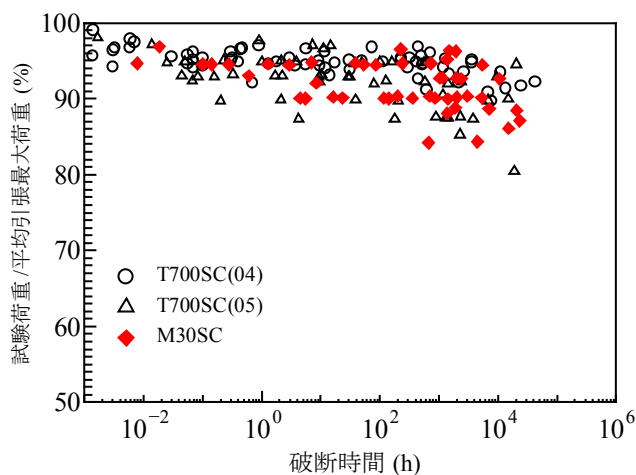
図Ⅲ 2.3(2)5-2 高温疲労試験結果

(2) ストレスラプチャー試験

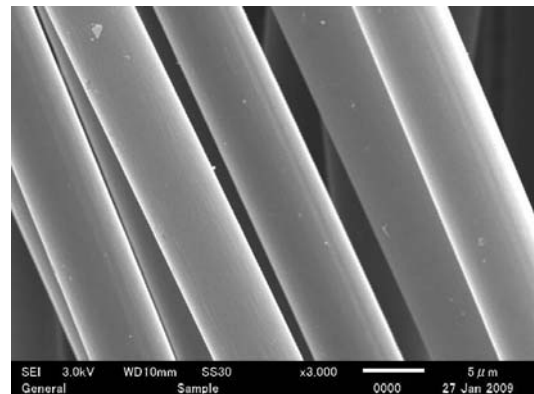
CFRPの平均引張破断荷重90%以上のストレスラプチャー試験では、破断時間の最長値と最短値は40,000時間以上の差を生じることを確認した(図Ⅲ 2.3(2)5-3)。また、機械的特性の異なる炭素繊維を用いていてもマトリックス材が同一の場合は、一方向CFRPのストレスラプチャー試験結果に明確な違いは現れないことを確認した(図Ⅲ 2.3(2)5-3)。CFRPのストレスラプチャー試験における破断時間の最長値と最短値の差は、引張強度のバラツキの他にマトリックス材であるエポキシ樹脂の常温クリープ及び吸水・乾燥にともなう応力の配分状態が変化することが原因と考えられる。

CFRPの平均引張破断荷重92%のストレスラプチャー試験では、24,000時間で破断したストレスラプチャー試験片の炭素繊維表面には、ストレスラプチャーの起点となるような応力腐食の痕跡は確認されない(図Ⅲ 2.3(2)5-4)。よって、CFRPはGFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)とは異なり、ストレスラプチャー特性が強化材の劣化現象に無関係であることを明らかにした。

30MPa 120°Cの水素雰囲気中で1000時間保持した後にスリーブ（つかみ部）を接着し、ストランド材（一方向に引き揃えた炭素繊維を樹脂で結合させた線状の試験片）のCFRPの引張試験を実施した結果、水素による引張強度の低下が起っていないことを確認した。また、120°Cの大気中で1000時間保持後のCFRPのストランド材の引張試験を実施し、120°C保持による引張強度の低下は示さなかった。



図Ⅲ 2.3(2)5-3 ストレスラプチャー試験結果



図Ⅲ 2.3(2)5-4 試験後の炭素繊維表面

(3) 損傷き裂進展試験

プラスチックライナー製複合容器に切り傷を付けサイクル試験を実施した。容器は積層構成の影響を調べるため多層巻きと単層巻きの容器の2種類にて試験を行った。積層構成に関係なく、サイクル一回目から傷は層間はく離により周方向に進展し、数回目までに全周はく離に至るケースがほとんどだった。

破裂試験および落下後サイクル試験においてライナー口金付近から漏えいした金属ライナー製複合容器のライナーについて調査を実施した。いずれも断熱せん断変形帯と思われる破面を示しているが、原因については、ライナー成形条件について明らかにされていない部分が多く、成形中の結晶粒度、加工度、温度など様々な機械的特性に与える要因が不明であるため特定できていない。

(4) 暴露引張試験

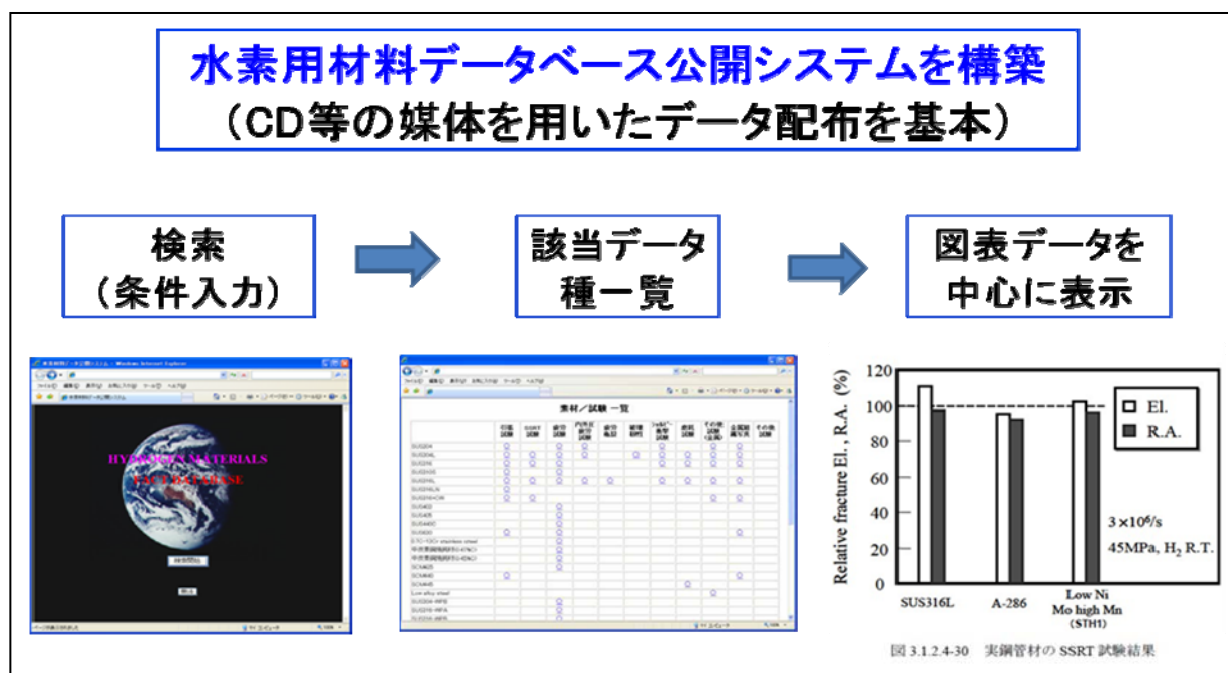
エポキシ、不飽和ポリエステル及びポリイミドは水素暴露後に引張強度及び伸びの低下を示した。ゴム材料はいずれも引張試験からは水素暴露は確認できなかったが、ブリスタ（表面に現れる袋状又はへこみ状の欠陥）の影響については注意が必要である。

2.3(2)6 水素用材料物性調査およびデータベース化（財団法人金属系材料研究開発センター（JRCM））

(1) データベース化

近年、燃料電池自動車の燃料積載方式として高圧水素ガス方式が有力になってきており、今までに蓄積してきた高圧水素ガス利用のための材料試験データの公開を希望する声が高まっている。このような要請を受けて、平成 20 年度では、公開のためのコンテンツ編集方法、サーバなどシステムの方式、CD を利用したデータ伝達方法についてシステム設計を行い、「水素用材料データベース公開システム（公開システム）」（図Ⅲ 2.3(2)6-1）を作成した。

高圧水素タンク用ライナー材料、配管材料、バルブ・継手用材料について、高圧水素ガス雰囲気中での材料特性試験を行い、試験結果を水素用材料データベースに登録した。基本的には、引張試験、SSRT、疲労試験、内外圧疲労試験、疲労き裂進展試験の 5 種類の特性試験を、35MPa 対応、70MPa 対応の高圧水素ガス中で実施した。また、必要に応じて、実用時を想定した材料の加工や溶接などを考慮した材料についても、特性評価試験を行った。水素安全利用等基盤技術開発プロジェクト（平成 15 年度～平成 16 年度）のデータも含めた。



図Ⅲ 2.3(2)6-1 水素用材料データベース公開システムの概要

(2) 水素材料に関する技術調査

車載用燃料電池が注目を浴びるようになって久しいが、燃料とする水素の供給方式については、燃料改質、水素吸蔵合金、圧力容器の方式があり、本命となる供給方式が定まっていなかった。そこで、特許動向調査を行い、それに基づく水素材料に関する文献調査を平成 19 年度に実施した。

結果、圧力（高圧）容器が水素供給方式の本命と考えられるようになり、具体的な検討が始まりつつあることを示唆され、本研究の方向性に齟齬がないことを改めて確認できた。

2.3(2)7 水素特性試験装置の開発及びそれを用いた水素用材料の基礎物性評価（独立行政法人産業総合研究所（JRCM より再委託））

(1) 研究の目的

70MPa 級高圧水素貯蔵は国際的潮流の中で各国で開発が進められているが、これらを常用圧力でみると、車載容器が70MPa、蓄圧器が103MPa、圧縮機が蓄圧器よりも更に高い圧力が検討されている。これらの高圧ガス機器では、更に圧力計、安全弁、弁、配管等の高圧ガス関連部品が装備され、各々使用圧力によって安全のための品質保証圧力が決められている。そのような100MPa を超える高圧水素ガスに対する材料技術の基盤を構築するために、水素特性試験装置を開発すると共に、高圧水素貯蔵関連のオーステナイト系ステンレス鋼やニッケル基合金等の候補材料の高圧水素ガスに関する基礎物性を評価し、水素用材料の技術的指針に資するデータを取得した。また、例示基準材料の拡張に当たり、材料特性に及ぼす水素の影響の一次評価指標（修正Ni当量）の高精度化を図ると共に、含有水素量迅速測定装置を導入し、材料外への水素拡散を十分に考慮しながら含有水素量を計測しつつ内部可逆水素脆化の影響を調べた。

(2) 水素用材料の基礎物性評価

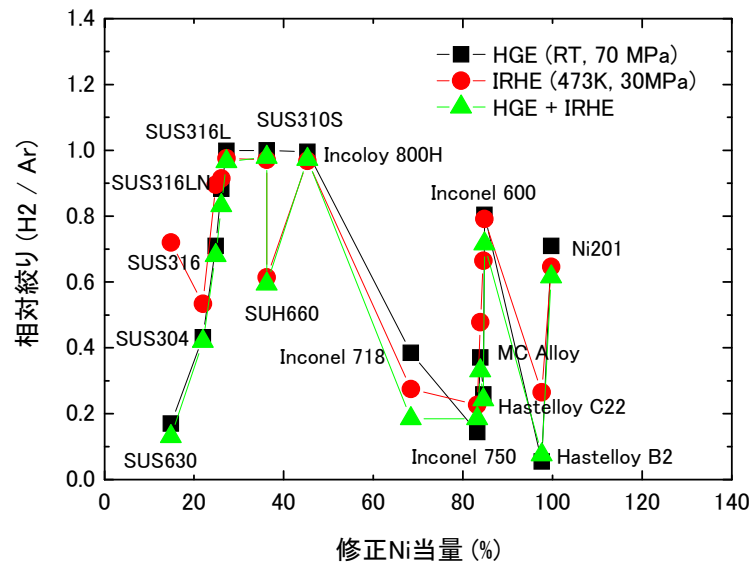
高圧水素貯蔵技術用候補材料の水素脆化特性を調べるために、供試材として析出硬化型マルテンサイト鋼としてSUS630、オーステナイト系ステンレス鋼としてSUS304、SUS316、SUS316LN、SUS316L、SUS310S、鉄基合金としてSUH660、ニッケル基合金として、Incoloy 800H、Inconel 718、Inconel 750、MC Alloy、Hastelloy C22、Inconel 600、Hastelloy B2、Ni 201の標準材について水素脆化試験を実施した。水素脆化試験には、室温70MPaの高圧水素ガス脆化試験と、水素チャージしたもの（内部可逆水素脆化）の試験とを歪み速度 $4.2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ の低歪み速度引張試験で併せて実施した。その結果を相対絞りに及ぼす修正Ni当量の影響として図III 2.3(2)7-1に示す。修正Ni当量は次式を用いて算出した。

$$\text{修正Ni当量} = \text{Ni} + 0.65\text{Cr} + 0.98\text{Mo} + 1.05\text{Mn} + 0.35\text{Si}$$

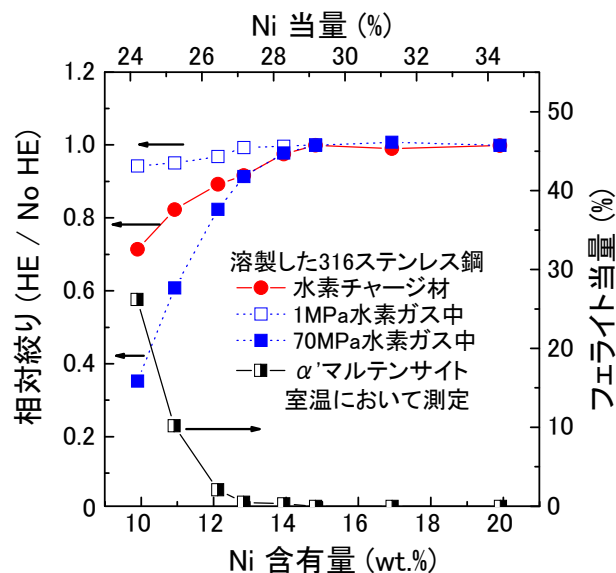
オーステナイト系ステンレス鋼の水素脆化の修正 Ni 当量依存性が、ニッケル基合金まで拡張できるかどうかは理論的根拠を必要とするために議論があるところだが、図の合金群の結果から、高圧水素ガス脆化が大きいものと内部可逆水素脆化が大きいものとに分類できることが示される。材料の強化機構に関連して、例えば析出硬化型と固溶強化型とか水素チャージによるトラップサイトの問題とかによる議論があり得る。一般的に水素ガス脆化は化学成分依存性を特徴とし、内部可逆水素脆化は組織依存性を特徴とすることが、材料選定上重要な要因であると考えられる。なお今後、更に多くの事例を集めて材料選定として利用できるようにしたいと考えている。

Ni含有量を変化させた316型オーステナイト系ステンレス鋼の70MPaアルゴン中および70MPa水素中の相対絞りに及ぼすNi当量の影響を図III 2.3(2)7-2に示す。水素チャージ材、1MPa水素中および70MPa水素中で試験した何れの材料においても、相対絞りはNi当量の増加と共に増加し、水素の影響は小さくなった。Ni当量29%以上では、相対絞りはほぼ1.0になり、

水素の影響は認められなくなった。一方、引張破断後のひずみ誘起マルテンサイトの生成量は、Ni当量29%以上では殆ど生成されなくなり、水素脆化とひずみ誘起マルテンサイトの関連が注目される。また、水素ガス圧の増加と共に水素ガス脆化は大きくなった。水素チャージ材の内部可逆水素脆化は1MPa水素ガス中より大きく、70MPa水素中の水素ガス脆化より小さかった。



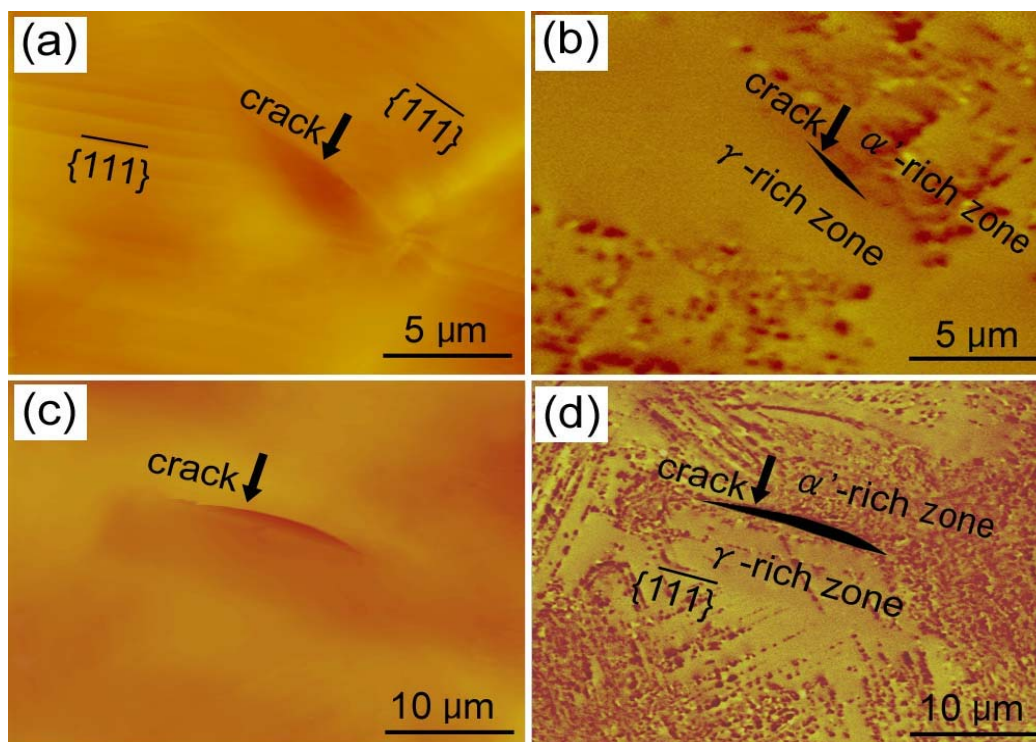
図III 2.3(2)7-1 高压水素脆化(HGE、Hydrogen Gas Embrittlement)及び内部可逆水素脆化(IRHE、Internal Reversible Hydrogen Embrittlement)に及ぼす修正Ni当量の影響



図III 2.3(2)7-2 溶製したSUS316型オーステナイト系ステンレス鋼の70MPa水素中の水素ガス脆化および内部可逆水素脆化に及ぼすNi含有量の影響

この他、316LN型オーステナイト系ステンレス鋼の水素ガス脆化および内部可逆水素脆化に及ぼす窒素量の影響についても調べ、Niとは異なる窒素の効果を認めた。

このように、オーステナイト系ステンレス鋼の水素脆化は加工誘起マルテンサイトと密接な関係があることが分かったので、更に水素脆化とマルテンサイトとの関係を調べるために、磁気力顕微鏡 (MFM、Magnetic Force Microscopy) を用いてマルテンサイト相の微視的観察を実施し、水素脆化の要因解析を実施した。当所に保有している走査プローブ顕微鏡にMFM用スキャナーおよびトップビュー光学顕微鏡を増設し、MFM装置として使用した。供試材としてSUS304鋼を30MPa水素中200°Cで250時間水素暴露した試料を用いた。引張試験を行い、水素脆化評価を行うと共に、亀裂を観察した。SUS304の水素による亀裂の生成・成長のMFM測定結果を図III 2.3(2)7-3に示す。亀裂は α' 加工誘起マルテンサイトとオーステナイトの界面近くの γ {111} 向き面に沿って生成・成長した。これらの観察結果から、オーステナイトとマルテンサイトにおける水素の溶解度差とマルテンサイト中の水素の拡散はオーステナイトに比べて速いことを考慮すると、水素はマルテンサイト/オーステナイト界面に一旦集積し、そこからオーステナイトへ向かって拡散する。このため、水素はオーステナイトの γ {111} 向き面に亀裂を生成させるものと考えられる。



図III 2.3(2)7-3 原子間力顕微鏡 (a, c)および磁気力顕微鏡 (b, d)によるSUS304水素チャージ材の亀裂の観察

2.3(2)8 極低温ガス環境下での材料特性に関する研究（独立行政法人 物質・材料研究機構（JRCM より再委託））

(1) 概要

水素エネルギーの社会への普及のためには、実際に用いる材料について 70 MPa 以上の超高压化での水素の材料への侵入による水素環境脆化を十分に評価する必要がある。近年、燃料電池車用の水素ステーションでの高压水素充填法として、液体水素の急速気化による高压水素の充填が検討され、数 10 MPa の高压水素かつ極低温環境下での材料特性取得と水素脆化感受性の評価が求められているが、従来法では困難であった。

そこで本研究では、まずオーステナイト系ステンレス鋼の室温から液体ヘリウム温度にかけての引張試験を行い、77 K 以下での荷重－伸び曲線と試験片の発熱挙動を把握するとともに、塑性変形量とマルテンサイト変態量の関係を求めた。次に、極限環境下での材料試験を簡便に実施する方法を考案し、オーステナイト系ステンレス鋼の高压水素環境下の試験に適用し、試験法の有効性を検証するとともに、水素環境脆性を評価した。さらに、タンクの充填時の昇圧環境の特性を把握するため、120°Cでの高压水素環境試験を実施した。

(2) 試験方法

(a) 低温でのオーステナイト系ステンレス鋼の加工誘起マルテンサイト変態

供試材は、市販の SUS304L 及び SUS316L の厚さ 28 mm の溶体化処理済み材であり、試験片は平行部直径 6.25 mm の丸棒引張試験片である。試験片平行部のフェライト量を、フェライトスコープにより測定した。引張試験時はクロスヘッド速度を 0.81 mm/min (約 4×10^{-4} /s) とした。試験温度は、4, 20, 40, 60, 77 K 及び 193, 223, 233, 243, 263 K と室温(296 K)で行った。4, 20, 40, 60 K においては塑性変形量 5 %, 10 %, 15 %でのフェライト量を、フェライトスコープのプローブを冷却状態の試験片に数点押し当てて測定した。193, 223, 233, 243, と 263 K では、引張試験を中断せずに、負荷中の試験片にプローブをあてて測定した。

(b) 極低温水素ガス環境下の材料特性評価

簡便な高压水素下材料試験法として試験片内の微小空隙に高压水素環境を設定する方法（特開 2007-286036 : 「材料試験装置と材料試験片」）の概略図を図 III 2.3(2)8-1 に示す。本試験法の特徴は、試験片を極限環境に設定した容器内に入れて試験をするのではなく、試験片内の微小空隙に環境設定することにより、試験片外部に環境設定した場合と同様の結果が簡便に得られることである。

試験片の平行部直径は 6.25 mm で、内径 1 mm または 2 mm の穴であり、空隙断面積を試験片断面積と比べて約 10 分の 1 以下とすることで、得られる引張特性などの基本的材料特性への影響は小さい。また、試験片内のジョイント部を含めた空隙の体積をおよそ 0.5 cm³ 以下にできるので、封入するガス量は 10 MPa の試験で大気圧での 50 cm³ 程度で済み、取扱いも容易である。なお、ボンベ圧以上の圧力の試験を行う場合には、小型増圧器を用いた。

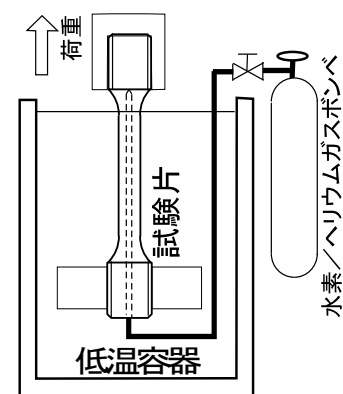
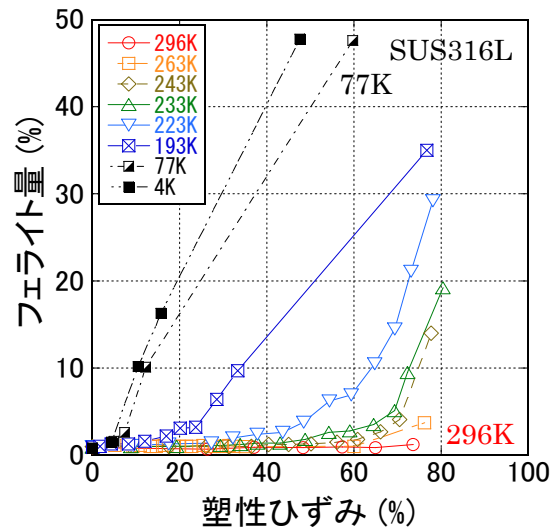
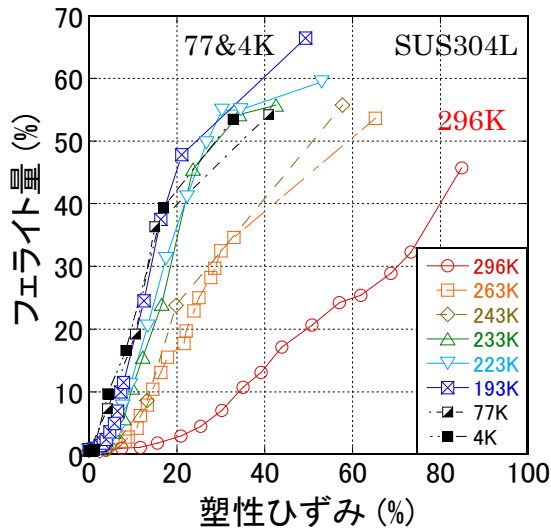


図 III 2.3(2)8-1 簡便な高压水素試験法



図Ⅲ 2.3(2)8-2 SUS304L と SUS316L の 293～193 K 及び 77 と 4K におけるフェライトスコープで測定した α 相の量と塑性ひずみの関係

水素環境脆化を、水素環境中で得られた絞りの値をヘリウム環境中で得られた絞りで除することで評価し、これにより得られる相対絞りの変化を従来の報告と比較することで、考案した本試験法の有効性を検証した。設定したガス圧力は、10 MPa と 70 MPa 級とした。10 MPa 級というのは、試験片に直結したポンベの圧力の変動があるためで、11～14 MPa であった。引張試験のクロスヘッド速度は 3.6 mm/h (初期歪み速度で $2.8 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) とした。試験温度は、室温(298 K)、190 K、及び液体窒素温度(77 K)とした。77 K の試験は液体窒素中に、190 K の試験は冷凍器により温度制御されたアルコール中に試験片を漬けて行った。

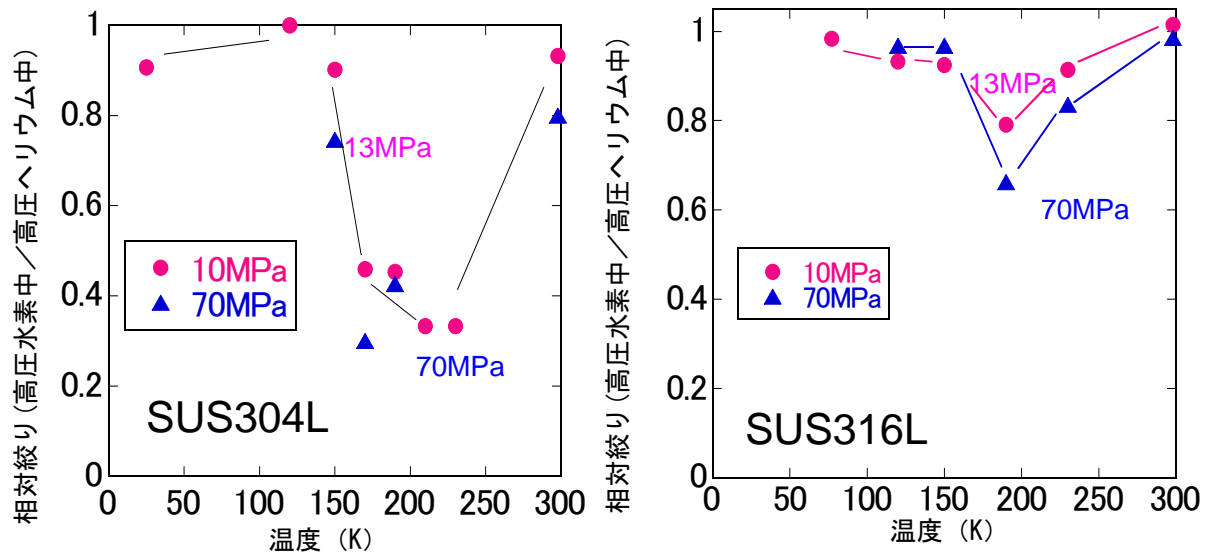
(3) 結果

(a) 低温でのオーステナイト系ステンレス鋼の加工誘起マルテンサイト変態

図Ⅲ 2.3(2)8-2 に、SUS304L と SUS316L の 293K から 193K における塑性変形に伴うフェライト量の変化を 77K と 4K の変化とを併せて示す。263K と 243K におけるフェライト量は、塑性変形範囲全体で、193K や 77K、4K より少なかった。77K、4K より温度が高い 263K、243K 及び 193K では、オーステナイト相が安定で、フェライトの生成が遅れている。SUS304L では温度の低下とともに、フェライト量の増加の立ち上がりが早まっているが、SUS 316L は 293K から 193K では塑性歪み量 10%までは、ほとんどフェライトが生成されず加工誘起マルテンサイト変態が起きていないことが分かる。

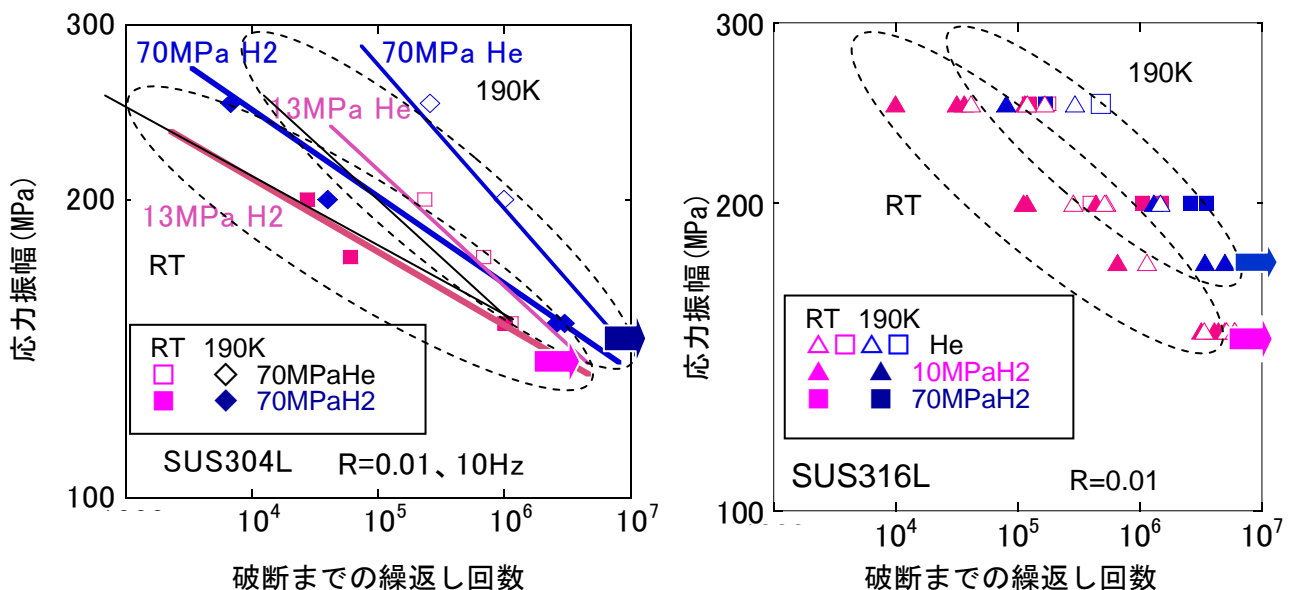
(b) 極低温水素ガス環境下の材料特性評価

引張試験において、従来の高圧容器中の試験と同様に、SUS304/304L では水素中の荷重-伸び曲線は、He 中の荷重-伸び曲線の途中で破断に至り、水素中試験で得られる伸びと絞りも減少した。水素圧が大きいほど減少度が大きかった。低温で脆化の度合いが大きくなったが、77K では延性的に破断した。SUS316L では、水素の影響は小さかった。図Ⅲ 2.3(2)8-3 に、SUS304L と 316L の 10MPa 級及び 70MPa 水素中における相対絞りの温度による変化を示す。低温で脆化の度合いが大きくなり 200K 付近で脆化が最大となり 77K ではほぼ延性的に破断したが、この評価においては荷重-伸び曲線で見られたほどの圧力の差は見られなかった。



図Ⅲ 2.3(2)8-3 SUS304LとSUS316Lの高圧水素中における相対絞りの温度による変化

SUS304Lと316Lの室温13MPa及び190K70MPa高圧水素環境中とヘリウム中で得られたS-N曲線を図Ⅲ 2.3(2)8-4に示す。SUS304Lの室温及び190Kの0.2%耐力は、それぞれ約200MPaと230MPaであり、応力振幅の150MPaはピーク応力で300MPaになり、0.2%耐力を超え塑性変形域ではあるが、室温でも190Kでも水素による影響は小さかった。試験応力が高く、すなわち塑性変形量が大きくなると、水素の影響が見られ、水素環境の方が寿命が短くなり、見かけ上、S-N曲線の傾きが小さくなった。両鋼種とも、190Kでの疲労寿命は室温よりも増加しており、試験応力が小さいときは水素による影響は小さく、試験応力が高いときは水素中の方が寿命が短くなったが、SUS316Lでは水素圧の影響が若干小さかった。引張特性では190K付近で伸びと絞りが極小となり顕著な水素環境の影響が見られたが、疲労特性では、低温において材料の強度が増加することから疲労特性は室温より増加し、引張の絞りで見られた低温での水素の影響の増加は、疲労特性では見られなかった。



図Ⅲ 2.3(2)8-4 SUS304LとSUS316Lの疲労特性に及ぼす高圧水素環境と温度の影響

2.3(2)9 水素用材料の疲労・トライボロジー特性研究（九州大学（JRCM より再委託））

(1) はじめに

高圧水素用バルブ、レギュレータ、コンプレッサー、タンクに使用される材料（ステンレス鋼、ばね鋼、アルミ合金など）の寿命疲労特性における、材料中の水素、繰返し応力、繰返し数、破損時間の影響を明らかにする。疲労試験で得られた結果を、国内外の学会や委員会で報告、議論するとともに、製品の強度設計基準や関連法律の規制緩和等の根拠データとして提示する。またバルブ内可動部品の水素環境での疲労強度を評価する。このデータを、バルブ等の定期点検検査期間延長などの判断資料として役立てる。

(2) 実施内容

(a) 高圧バルブ、レギュレータ、コンプレッサーに使用される材料の疲労特性の評価

①疲労寿命データ取得、②疲労き裂伝ば特性データ取得

(b) バルブ内可動部品の水素環境の疲労強度

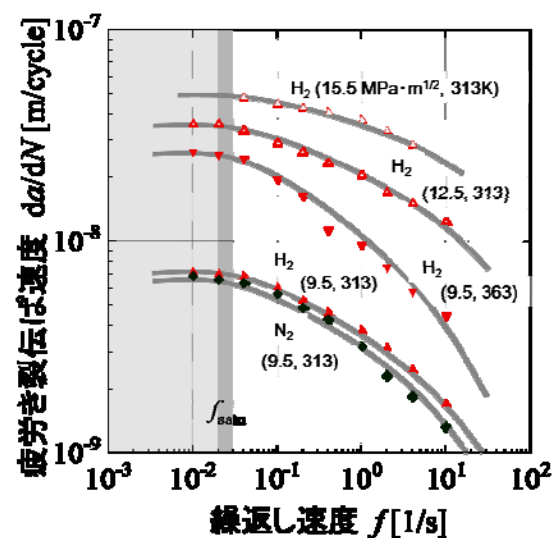
①長期使用模擬実態バネの疲労データ取得

②弁体摺動部品材料のフレットング疲労データ取得

(3) 結果まとめ

時効硬化アルミニウム合金 A6061-T6、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS304、SUS316L、SUS310S を対象に、水素ガス雰囲気における疲労き裂伝ば速度の繰返し速度依存性に関するデータを採取し（例：図Ⅲ 2.3(2)9-1）、さらにオーステナイト系ステンレス鋼 SUS304 および SUS316L を対象に、疲労限度近傍の疲労強度に及ぼす水素ガス雰囲気の影響を調査することによって、疲労強度設計基準の根拠を示した。また、工業用純チタンを対象に、材料内水素の疲労強度特性におよぼす影響を調査し、材料内水素が疲労強度に対して有利に働く場合があることを示した。

ステンレス鋼製ばねの疲労強度に及ぼす水素チャージの影響評価、表面処理による強度向上に関する調査を行い、水素ガス環境中でばねを安全に使用する場合の根拠を示した。さらに、SUS304 に 30%の単軸引張予ひずみを付与した材料で水素ガス環境中フレットング疲労試験を行い、各種表面処理による水素ガス環境中でのフレットング疲労強度低下防止を調査することによって、弁体摺動部品などの安全向上案を示した。



図Ⅲ 2.3(2)9-1 A6061-T6 の水素ガス中疲労における繰返し速度依存性

2.3(2)10 長期使用水素設備の解体調査結果

本プロジェクトでは、液体水素や高圧水素などの水素関連機器に用いられる材料の耐久性を把握するために様々な材料特性評価を実施したが、実際に長期間使用した機器を調査し、その使用期間における材料の劣化度を把握しておくことも、個々の材質特性評価とともに有益な知見を得る有効な方法である。過去には、10年間使用した液体水素ローリー容器（水素利用国際クリーンエネルギーシステム技術（WE-NET）サブタスク6低温材料技術の開発 平成10年度成果報告書）や新日本製鐵株式会社総合技術センター内に設置されている液体水素雰囲気下材料試験装置の一部部品に対し解体調査を実施し、水素社会構築に向けた有益な知見が得られている。

そこで本プロジェクトでも、下記の水素関連機器・設備を解体し、採取した材料を調査し、水素中で使用することによる特性劣化の有無や施工・製作時の注意事項の抽出を行った。

- (1) WE-NET 高松水素ステーション（約3年使用）：40MPaの高圧水素に曝された蓄圧器、配管類、弁・計器類など
- (2) 液体水素コンテナ（約18年使用）：3,400リットル液体水素容器厚板
- (3) 液体水素ローリー（約22年使用）：18,000リットル液体水素容器厚板、配管類、計器類
- (4) JHFC 君津液体水素製造設備（約3年使用）：配管類

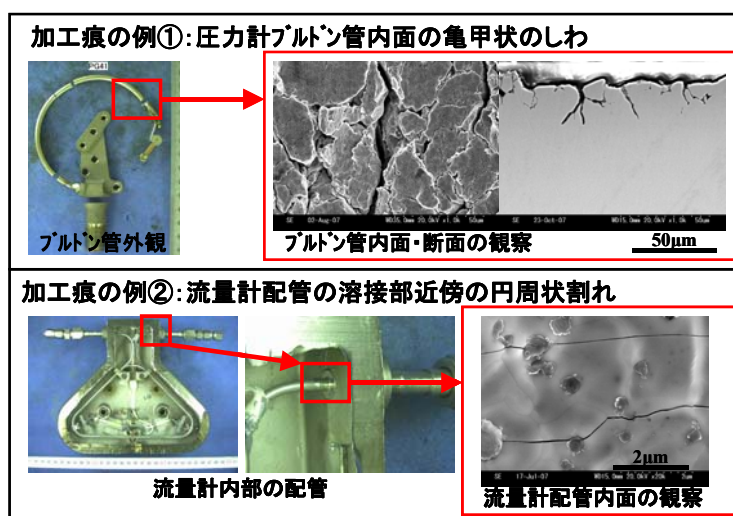
(1) WE-NET 高松水素ステーションの解体調査

調査した範囲では、蓄圧器（蓄ガス器）、弁・計器類、配管類とも、水素ガスを用いた運転中に発生したと考えられる割れや亀裂、材質特性劣化は認められなかった。

しかし、蓄厚器の口金部内面側には、製造工程で生じた最大深さ3mmのしわ疵が多数確認され、弁・計器類でも製造工程で形成されたと考えられる加工痕などの表面欠陥が観察された（図Ⅲ 2.3(2)10-1）。蓄圧器に関しては破壊力学的な解析を実施しその安全性を検討したところ、しわ疵周辺の脱炭軟化した部分に使用中に亀裂発生する可能性は否定できないが、本設備の使用条件範囲では、直ちに破断に至るような大きな亀裂進展は無いと考えられた。

このように、製造時に導入された表面欠陥は、直ちに危険と判断されるものではないが、高圧水素環境下で使用することを考えると、できるだけ水素脆化しない材料を選択・使用するとともに、応力が集中する切欠きとして作用するこれら欠陥は極力低減あるいは除去することが望ましいとの提言を行った。

なお、本調査結果は、本プロジェクトの成果報告書とは別に、平成20年3月に調査担当機関の共著で540余頁の報告書に取りまとめた。



図Ⅲ 2.3(2)10-1 圧力計(上)及び流量計(下)内部の表面疵例

(2) 液体水素コンテナ容器

液体水素に主に曝された部分及び低温水素ガスに主に曝された部分から、SUS316L 厚板母材および溶接部を含む試料を採取し、断面組織観察（含硬度分布測定、含有元素分布測定）、シャルピー衝撃試験（室温、 -196°C ）、引張試験（ -40°C の低温水素ガス中、液体水素中）などを実施した。その結果、使用中の劣化と思われるような特性低下がないことを確認した。SUS316L は液体水素用の容器材として極めて安定な材料であることが示唆された。

ただし、溶接部の当て板に SUS304 を使用しており、溶接部に C の濃化に起因したと思われる軽微な鋭敏化が認められた。直接液体水素や低温水素ガスに触れていないため実用上大きな支障はないと思われるが、SUS316L でも鋭敏化すると低温水素ガス中でわずかながら延性低下を示すことから、より低 C 量の L 材を使用することが望ましいとの提言を行った。

(3) 液体水素ローリー

15ton トラックに搭載された 18,000 リットル容器及び車台後部の付属部品（配管・弁・計器類）の液体水素あるいは低温水素ガスに曝された部分から試料採取し（SUS304 または 304L）、表面観察（浸透探傷試験、SEM 観察）、断面組織観察（含硬度分布測定、含有元素分布測定）、シャルピー衝撃試験（ -196°C ）、引張試験（液体水素中）、水素分析などを実施した（図 III 2.3(2)10-2 参照）。その結果、水素中あるいは極低温環境にて長期間使用されたことによる特性劣化やそれを示唆するような現象は検出されなかった。

ただし、一部表面に、酸洗により生じたと思われる窪みや溶接ビードに沿った線状被さり疵が見つかった。いずれも軽微であり実使用に際して特に問題となるようなものではないが、SUS304 は低温水素ガス環境脆化を起こすことが知られており、低温水素ガスに接する部分では、これら欠陥の発生原因と考えられる酸洗や溶接余盛り除去を行う際に、一定の注意が必要であること、SUS304L や SUS316L などの鋭敏化しにくい低 C 材の使用が推奨されるなどの提言を行った。

(4) 君津液体水素製造設備

水素ガス導入配管から各液化工程を経て液体水素払出し管まで、種々の温度・状態の水素と接する配管、弁類を、内表面観察を中心に調査した。使用中に生じたと思われる欠陥は確認されなかったが、施工上の課題が見つかっており、関係者への報告会を提案した。



図III 2.3(2)10-2 上から、解体調査に供した液体水素ローリー（15ton トラック）、ステンレス鋼製内容器、台車後部の付属部品

2.3.(2)11 研究成果のまとめと今後の展望

本事業は、「水素社会構築共通基盤整備事業」として、既存規制の見直し等に資するデータ、高度な技術基準及び標準化案を国内及び国際標準に提案するためのデータ取得及びそれに係わる技術開発を実施することにより、燃料電池自動車を中心とした水素関連技術を広く安全に一般社会へ普及させた水素エネルギー社会を実現し、我が国エネルギー供給の安定化・効率化、地球温暖化問題・地球環境問題の解決、新規産業・雇用の創出等を図ることを目的とする。

本研究開発は、「水素インフラ等に係る規制再点検及び標準化のための研究開発」を対象とした「水素用材料基礎物性の研究」として、燃料電池車用車載水素燃料タンクおよび関連部品、水素供給ステーションの各種部品に使用される材料に関して、規制再点検及び標準化の根拠となる材料特性を評価し、裏付けデータおよび関連基礎知見を取得・提供することを目標とするものである。

具体的には、車載水素燃料タンク、配管、バルブ・継手類、水素貯蔵・輸送容器など高圧水素および液体水素機器用材料を安全に使用するための特性データの取得と研究開発を実施した。即ち、①高圧水素タンク用ライナー材の研究開発、②高圧水素配管材料の研究開発、③高圧水素バルブ・継手用材料の研究開発、④液体水素用構造材料の研究開発、⑤水素用非金属材料の基礎物性に関する研究開発、⑥水素用材料物性調査およびデータベース化、⑦水素特性試験装置の開発およびそれを用いた水素用材料の基礎物性評価、⑧極低温ガス環境下での材料特性に関する研究、⑨水素用材料の疲労・トライボロジー特性研究、を課題とする研究開発に取り組んだ。

その結果、90MPa 級の高圧水素ガス中での引張特性、疲労に関するデータをはじめとする多くのデータを取得し、以下の成果をあげることにより、目標を達成した。

(1) 例示基準策定・改訂の根拠となる材料評価データ取得・提供

候補材 (A6061-T6、A6061HS-T6 (Si 増量材)、SUS316L) と比較材(SUS304、304L、STH1、STH2 等)の高圧水素ガス中特性評価(SSRT、疲労試験、疲労き裂伝ば試験)を実施し、70MPa 機器用材料の標準化に向けた特性データを取得した。そして、車載容器に関する技術基準である「70MPa 圧縮水素自動車燃料装置用容器の技術基準」(KHK S 0128、H22.7.23 制定)の策定に貢献した。

(2) 高圧水素用材料種の拡大に向けた各種材料の評価

(1)で評価した材料以外に、各種ステンレス鋼(含む STH1、STH2)、合金鋼、耐熱鋼(SUH660 等)、アルミニウム合金、チタン等の評価を高圧水素中で実施し、材料特性データを蓄積した。

(3) 複合容器向け材料の評価

CFRP のストレスラプチャー試験データ及び疲労試験データを拡充した。

(4) 水素環境脆化簡便評価法の展開

極低温かつ高圧の水素ガス環境等、特殊な極限環境下における材料特性評価技術を確立し、材料特性データ簡易評価技術の適用範囲を拡大した。

(5) 標準化の技術的根拠とするための金属学的基盤解析・研究

低周波数の内外圧疲労試験による試験周波数の疲労特性に及ぼす影響把握、オーステナイト系ステンレス鋼の水素環境脆化影響因子の解析（偏析、すべり(転位組織)の性格、Ni 当量の影響など）、被削性向上元素である S の影響調査、等を実施し、数多くの新たな知見を得た。

(6) その他活動、ノウハウ・重要知見の蓄積と情報公開

各種高圧水素使用試験技術の習熟、液体水素中材料特性評価、WE-NET 高松水素ステーションや 20 年以上使用した液体水素ローリーなど長期使用水素関連機器の解体調査、トライボロジー特性研究、鉄鋼協会討論会・圧力技術誌への組織的発表、水素の有効利用ガイドブック（エネルギー総合工学研究所編集）の材料技術関連章項全 70 余頁の執筆およびデータベースの拡充等を実施した。なお、WE-NET 高松水素ステーション解体調査結果については、全 540 余頁の報告書を別途作成した。

2015 年には本格的な普及開始期に入ると予測されている燃料電池自動車をはじめとする水素の利用においては、高い信頼性と安全性の下に様々な材料を使用する必要がある。しかし、高圧水素ガス雰囲気における材料特性に関するデータと材料使用に関する経験の蓄積はまだ十分なものとは言えず、今後明らかにしなければならない課題も少なからず残されている。使用可能な材料のさらなる拡大、使用条件範囲（組成、履歴、脆化の程度等）をより明確にする材料データが必要である。加えて、現行の高 Ni、Mo 含有材（SUS316L、SUH660 等）に替わる、低コスト・高強度・高耐水素脆性・高利用加工性・省資源等の特徴を具備した新しい高機能水素用材料の開発等の研究開発も望まれるところである。

2.3.2.12 特許出願、論文、外部発表等の状況

(1)特許出願、論文、外部発表

区分 年度	特許出願			論文		その他 外部発表
	国内	外国	PCT※出願	査読付き	その他	
H17FY	6 件	0 件	0 件	8 件	1 件	51 件
H18FY	1 件	0 件	0 件	5 件	件	32 件
H19FY	0 件	0 件	0 件	11 件	1 件	28 件
H20FY	0 件	0 件	0 件	3 件	1 件	10 件
H21FY	0 件	0 件	0 件	8 件	件	7 件

(※Patent Cooperation Treaty：特許協力条約)

特許出願と論文の概要については、「Appendix 特許出願と論文リスト」に記載した。

(2) 受賞実績

- ①独立法人 物質・材料研究機構：緒形俊夫、日本金属学会 功績賞 工業技術部門（2006年3月）
- ②独立法人 物質・材料研究機構：緒形俊夫、平成20年度科学技術分野 文部科学大臣表彰科学技術賞研究部門、「極低温下での材料試験法の開発と材料特性解明に関する研究」（2008年4月）
- ③独立法人 物質・材料研究機構：緒形俊夫、由利哲美、小野嘉則、低温工学協会 論文賞、「オーステナイト系ステンレス鋼の低温での引張変形挙動と発熱及び加工誘起マルテンサイト変態」、低温工学会誌、vol.42 No.1、10～17、2007年1月発表（2008年5月）
- ④独立法人 物質・材料研究機構：緒形俊夫、2007国際低温材料会議～構造材料最優秀論文賞、“Hydrogen Embrittlement Evaluation in Tensile Properties of Stainless Steels at Cryogenic Temperatures”（2009年7月）
- ⑤独立法人 物質・材料研究機構：緒形俊夫、日本鉄鋼協会 浅田賞（2010年3月）
- ⑥新日本製鐵株式會社：CEC-ICMC Best Structural Materials Paper 2003, ICMC, (2005年9月)
「Notch Effect on Tensile Deformation Behavior of 304L and 316L Steels in Liquid Helium and Hydrogen」 K.Shibata, H.Fujii
- ⑦新日本製鐵株式會社：日本機械学会 関西支部賞 技術賞（2008年3月）「高圧水素ガス雰囲気下材料試験装置の開発」（（株）神戸製鋼所と共同受賞）
- ⑧住友金属工業株式会社：中村潤、日本材料学会第56期学術講演会（2007年5月）優秀講演発表賞 「外圧疲労試験による高圧水素ガス中の疲労特性評価と劣化機構の検討」
- ⑨住友金属工業株式会社：大村朋彦、腐食防食協会 H20 年度進歩賞 「腐食環境および高圧水素環境における鉄鋼材料の水素脆化に関する研究」
- ⑩住友金属工業株式会社：大村朋彦、宮原光雄、仙波潤之、平田弘征、五十嵐正晃、日本高圧力技術協会 H21 年度科学技術振興賞 「高圧水素ガス環境における SSRT および外圧疲労試験によるステンレス鋼の水素脆性評価」

(3) その他の公表（プレス発表等）

- ①H18年4月：『エコマテリアルハンドブック』（丸善）の3-③-3.4節「水素貯蔵（高圧水素，液体水素）」の執筆
- ②H20年3月26日掲載：鉄鋼新聞 「70MPaの高圧水素中でステンレスなどの材料特性データの取得に成功」
- ③H20年3月：『水素有効利用ガイドブック』（平成20年3月、NEDO）の水素用材料関連の章・節の執筆

2.3.2.13 実用化の見通し

70MPa級用使用材料の拡大のため、既存の高圧水素ガス環境下での試験装置を用い、簡易試験装置による一次探索試験も併行しつつ、現行材料・新候補材料の使用可能範囲の明確化、業界要望材の材料特性評価、高強度化候補材、安価候補材等の材料特性評価等を実施してきた。70MPa 級用材料特性データの取得では、最高圧力99MPa級高圧水素ガス雰囲気下材料試験装置を導入し(平成18年度)、それまでに導入した高圧水素用試験装置 (SSRT (低ひずみ速度引張試験装置) 等) を活用した評価結果と合わせることで、例示基準や技術標準の策定ための技術的根拠として提示することを進めてきた。これらの成果は、(社)日本自動車工業会、(財)日本自動車研究所、(財)石油産業活性化センターや高圧ガス保安協会等にて、70MPa 級機器の基準・標準化に向けた一連の活動に対し、技術データとして活用・反映される予定である。加えて、(財)石油産業活性化センターが進めている液体水素スタンドの基準・標準化に対しても、同様に、本研究で取得した材質特性データが技術データとして活用される。

さらには、上記の材料特性データの提示に当たり、取得した材料特性データに関する考察・評価では、同材料に発生した水素脆化現象に対する科学的考察や基礎的な現象解析も行っており、材料選択の根拠となる化学成分依存性や金属組織依存性等に関する知見も合わせて提示してきた。加えて、水素中の疲労き裂進展速度に及ぼす周波数依存性についての技術整理と試験方法・試験手順等への反映の検討も行っており、平成17年3月に施行された例示基準 (JARI基準、JIGA基準)、平成22年7月に制定された技術基準 (KHK技術基準) に反映した際と同様に、今後ともこれらの基礎解析も含めた一連の研究開発を推進することにより、関係産業界による水素社会構築に向けた基準・標準化の進展が図られることと理解している。

なお、本研究開発成果として得られた評価結果により、新たに水素中で使用可能な材料候補として、低Ni省Mo新ステンレス鋼 (STH1、STH2) やチタンなどが有効であることが判明し、近い将来に、現行材料に比べ耐水素脆化材料として優れた特性面およびコスト・製造性などの工業的観点から、利点の多い新規材料が実用化される見通しである(新日本製鐵(株)、他)。

また、高圧ガス保安協会にて実施されたCFRPのストレスラプチャー試験及び疲労試験結果は、車両搭載用容器の基準化を計画している(社)日本自動車工業会や水素用FRP製貯槽の基準化のための調査研究を行っている高圧ガス保安協会関連委員会に提供されており、CFRPの疲労特性には繊維材料とマトリックス材料の界面の接着強度がCFRPの寿命に重大な影響を与え、 1×10^5 回程度に限界があることから、FRP容器設計の安全率と寿命決定に必要な重要な根拠データとして、同結果を考慮した車両搭載用容器の設計や水素用FRP製貯槽の設計に反映される。

これらを通じて2015年に普及開始期を迎えるとされる水素燃料電池自動車の実用化、普及に直接的に貢献できるものと考えている。

Appendix 特許出願と論文リスト

【特許】

番号	出願者	出願番号	国内 外国 PCT	出願日	状態	名 称	発明者
1	(株)イオン工 学研究所、 (財)金属系材 料研究開発セ ンター	特願 2004-34800	国内	2004.2.12	取下	ステンレスパイプ および容器類にお ける水素バリア被 覆物品及びその製 造方法	日比野豊、 水野忠彦、 手塚真俊、 田村元紀
2	(株)イオン工 学研究所	特願 2005-19145 9	国内	2005.6.30	取下	ステンレスパイプ および容器類にお ける水素バリア被 覆物品及びその製 造方法	中山明、 水野忠彦、 田村元紀、 日比野豊
3	(独)物質・材 料研究機構	特願 2005-34739 7	国内	2005.12.1	取下	環境雰囲気制御に よる材料試験法	緒形俊夫
4	(独)物質・材 料研究機構	特願 2005-34739 8	国内	2005.12.1	取下	環境雰囲気制御に よる材料試験法	緒形俊夫
5	(独)物質・材 料研究機構	特願 2006-06002 7	国内	2006.3.6	審査 請求	材料試験片及びそ の製造方法	緒形俊夫
6	(独)物質・材 料研究機構	特願 2006-06005 6	国内	2006.3.6	審査 請求	耐圧室付き試験機 とこれを使用した 試験方法	緒形俊夫
7	(独)物質・材 料研究機構	特願 2006-32028 1	国内	2006.11.28	審査 請求	材料試験装置と材 料試験片	緒形俊夫

【論文】

番号	発表者	所属	タイトル	発表誌名、ページ番号	査読	発表年度
1	藤井秀樹	新日本製鐵(株)	極低温環境下におけるチタンの機械的性質	チタン, Vol.53-3 (2005), 210-216	無	2005 FY
2	大村朋彦	住友金属工業(株)	圧縮水素ガス輸送・貯蔵材料	工業材料, Vol.54, No.1(2006), 84-85	有	2005 FY
3	Yasuji ODA, Hiroshi NOGUCHI, et al	九州大学	Fatigue Characteristics of a Type 304 Austenitic Stainless Steel in Hydrogen Gas Environment	International Journal of Fracture, Vol.133, No.3, 277-288.	有	2005 FY
4	Yasuji ODA, Hiroshi NOGUCHI, et al	九州大学	Effects of Hydrogen Gas Environment on Fatigue Behavior of Austenitic Stainless Steel	Key Engineering Materials Vol. 297(2005), 927-932.	有	2005 FY
5	村上敬宜, 他	九州大学	マルテンサイト系ステンレス鋼の疲労強度に及ぼす水素チャージの影響	材料, 54(2005), 1217-1224.	有	2005 FY
6	峯洋二, 村上敬宜, 他	九州大学	炭素鋼の繰返し応力-ひずみ特性および疲労挙動に及ぼす水素チャージの影響	材料, 54 (2005), 1225-1230	有	2005 FY
7	久保田祐信, 栄中, 近藤良之, 他	九州大学	フレット疲労に及ぼす水素ガス環境の影響	材料, 54(2005), 1231-1236	有	2005 FY
8	久保田祐信, 栄中, 近藤良之, 他	九州大学	高強度鋼の疲労き裂進展下界条件に及ぼすき裂寸法, 応力比および水素の影響	材料, 54(2005), 1237-1243	有	2005 FY

9	村上敬宜, 他	九州大学	材料組織の異なるステンレス鋼の疲労強度に及ぼす水素チャージの影響	日本機械学会論文集(A編), 72, 106-113.	有	2005 FY
10	大村朋彦, 小林憲司, 宮原光雄, 工藤赳夫	住友金属 工業(株)	高圧水素ガス環境におけるステンレス鋼の脆化特性	材料と環境, Vol.55, No.4(2006), 139-145	有	2006 FY
11	大村朋彦, 小林憲司, 宮原光雄, 工藤赳夫	住友金属 工業(株)	ステンレス鋼の水素脆化感受性に及ぼす表面水素濃度の影響	材料と環境, Vol.55, No.12(2006), 537-543	有	2006 FY
12	緒形俊夫, 由利哲美, 小野嘉則	(独)物質・ 材料研究 機構	オーステナイト系ステンレス鋼の低温での引張変形挙動と発熱及び加工誘起マルテンサイト変態	低温工学会誌, vol.42 No.1, 10~17	有	2006 FY
13	尾田安司, 野口博司, 他	九州大学	水素ガス雰囲気におけるSUS316L鋼の疲労き裂伝ば特性	日本機械学会論文集(A編), 72, 1525-1523	有	2006 FY
14	Yasuji ODA, Hiroshi NOGUCH I, et al	九州大学	Effect of Hydrogen Gas Environment on Fatigue Crack Growth of a Stable Austenitic Stainless Steel	Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 1, 263-274.	有	2006 FY
15	大村朋彦	住友金属 工業(株)	圧縮水素ガス 輸送, 貯蔵材料	工業材料, Vol.56, No.1(2008), 40-41	有	2007 FY
16	大村朋彦, 平田弘征, 宮原光雄, 工藤赳夫	住友金属 工業(株)	高圧水素環境におけるステンレス鋼の脆化挙動に及ぼす化学組成の影響	材料と環境, Vol.57, No.1(2008), 30-36	有	2007 FY
17	大村朋彦, 宮原光雄, 仙波潤之, 五十嵐正晃, 平田弘征	住友金属 工業(株)	高圧水素ガス環境におけるSSRTおよび外圧疲労試験によるステンレス鋼の水素脆性評価	圧力技術, Vol.46, No.4(2008), 205-213	有	2007 FY
18	今出政明, 飯島高志,	(独)産業 技術総合	オーステナイト系ステンレス鋼の高圧水素ガス脆	日本金属学会誌, 72 (2008), 139-145	有	2007 FY

	福山誠司, 横川清志	研究所	化に及ぼす熱処理の影響			
19	緒形俊夫	(独)物質・ 材料研究 機構	試験片内の高圧水素環境 による水素脆化評価法の 検証	Advances in Cryogenic Engineering, vol.5 4, 124-131	有	2007 FY
20	緒形俊夫	(独)物質・ 材料研究 機構	Hydrogen embrittlement evaluation in tensile properties of stainless steels at cryogenic temperatures	圧力技術, vol.46, No.4(2008), 200-204	有	2007 FY
21	Yasuji ODA, Hiroshi NOGUCH I, et al	九州大学	Fatigue Crack Growth Characteristic and Effects of Testing Frequency on Fatigue Crack Growth Rate in Hydrogen Gas Environment in a Few Alloys	Materials Science Forum, Vol.567-568, 329-332.	有	2007 FY
22	Yasuji ODA, Hiroshi NOGUCH I, et al	九州大学	Influence of Testing Frequency on 6061-T6 Aluminum Alloy in Hydrogen Gas Environment	Key Engineering Materials, Vol.353, 174-177	有	2007 FY
23	尾田安司, 野口博司, 藤井秀樹, 他	九州大学	2次イオン質量分析法お よび水素マイクロプリン ト法によるSUS304 鋼の疲労き裂先端近傍の 水素濃度分布の分析	日本機械学会論文集 (A編), 73, 788-795	有	2007 FY
24	尾田安司, 野口博司, 他	九州大学	SUS316L平滑材の10 ⁷ 回 時間強度に及ぼす水素ガ ス環境の影響(微視的疲労 き裂の挙動に注目して)	日本機械学会論文集(A 編), 73, 1343-1350	有	2007 FY
25	久保田祐信 , 栄中, 近 藤良之,	九州大学	フレット疲労に及 ぼす水素ガス環境の影響	材料, 56(2007), 1231-1236	有	2007 FY

	他					
26	久保田祐信 ， 栄中， 近藤良之， 他	九州大学	高強度鋼の疲労き裂進展下 界条件に及ぼすき裂寸法， 力比および水素の影響	材料， 56(2007)， 1237-1243	有	2007 FY
27	中川英樹	愛知製鋼 (株)	次世代エネルギーの水素 を使いこなす（耐水素脆 性）	特 殊 鋼 ， Vol.58， No.2(2009)， 12-13	有	2008 FY
28	中川英樹	愛知製鋼 (株)	各種ステンレス鋼の高圧 水素ガス環境下における 引張特性	愛知製鋼技報， Vol.26， No.1(2009)， 15-20	無	2008 FY
29	M. Imade, S. Fukuyama ， K. Yokogawa	(独)産業 技術総合 研究所	Apparatus for material tests using an internal loading system in high-pressure gas at room temperature	Review of Scientific Instruments, Vol.79 (2008),073903	有	2008 FY
30	緒形俊夫	(独)物質・ 材料研究 機構	簡便な水素環境試験法に よる構造用鋼の低温での 特性評価	圧力技術， vol.46， No.4(2008)， 200-204	有	2008 FY
31	藤井秀樹， 大宮慎一	新日本製 鐵(株)	316系ステンレス鋼の高圧 水素環境脆化特性におよ ぼすNiおよびCr量の影響	圧力技術， vol.47(2009)， 85-94	有	2009 FY
32	大宮慎一， 藤井秀樹	新日本製 鐵(株)	オーステナイト系ステン レス鋼の高圧水素中環境 脆化におよぼすNiおよび Cr量の影響	配 管 技 術 ， Vol.51-No.13(2009)， 46-50	無	2009 FY
33	大村朋彦	住友金属 工業(株)	腐食環境および高圧水素 環境における鉄鋼材料の 水素脆化	材料と環境， Vol.58， No.4(2009)， 120-126	有	2009 FY
34	大村朋彦	住友金属 工業(株)	圧縮水素ガス 輸送， 貯蔵材料	工 業 材 料 ， Vol.58， No.1(2010)， 18-19	有	2009 FY
35	山田敏弘， 竹花立美	高圧ガス 保安協会	FRP 複合容器用一方向炭 素繊維複合材料の疲労特 性	圧力技術， Vol.47， No.3(2009)， 171-177	有	2009 FY
36	山田敏弘， 竹花立美	高圧ガス 保安協会	FRP 複合容器用一方向炭 素繊維複合材の静的引張 特性	圧力技術， Vol.47， No.6(2009)， 369-377	有	2009 FY

37	柴田浩司, 緒形俊夫, 由利哲美, 藤井秀樹, 大宮慎一	(独)物質・ 材料研究 機構	液体水素中における 300 系ステンレス鋼の引張変 形挙動の計算機シミュレ ーション	圧力技術 Vol.47 , No.2(2009), 70-77	有	2009 FY
38	Y.Oda, H.Noguchi , H.Fujii, et al	九州大学	Investigation of Local Hydrogen Distribution Around Fatigue Crack Tip of a Type 304 Stainless Steel with secondary Ion Mass Spectrometry and Hydrogen Micro-Print Technique	J. of Solid Mechanics and Materials Engineering, 3 (2009) , 898-909	有	2009 FY

2.3(3) 水素用アルミ材料の基礎研究 ((社)日本アルミニウム協会、住友軽金属工業(株)、三菱アルミニウム(株)、古河スカイ(株)、日本軽金属(株)、(株)神戸製鋼所、昭和電工(株))

平成 15、16 年度の前事業で、水素の安全利用の拡大および高圧水素容器のライナー材などに使用するアルミニウム材料の標準化を目的として、高圧水素環境下での試験の代替として、安全かつ簡便な水蒸気分圧制御大気環境下低ひずみ速度 (SSRT) 試験法を開発するとともに、本試験法により水素脆化感受性評価データを取得したが、本事業ではこれを受けて、実際にアルミニウム合金がライナー材として使用されることを目指し、さらに詳細かつ多くのデータを取得した。この開発した試験法により得られたデータと高圧水素ガス実環境下での SSRT 試験データとを比較することにより、代替評価法としての有用性を示すとともに、本試験による脆化感受性データと水素の侵入・集積挙動との関係を調査し、基礎的な裏付けを行った。さらに、平成 22 年 3 月に予定されていた最高充填圧力を 35MPa から 70MPa に増加させるための新しい例示基準策定に対応し、自動車業界、容器メーカー、基準策定機関からのニーズ・情報を収集した。それを基に、容器の軽量化を目指し、最高充填圧力 35MPa の例示基準 JARI S-001,002 で定められた 6061 合金よりも高強度の 6000 系・7000 系合金について、湿潤環境下での引張および疲労試験により耐水素脆性を、大気中での引裂き試験により LBB(Leak Before Burst)に直結する靱性を評価した。一方、これら取得データの基礎的バックグラウンドとして、水素マイクロプリント法、昇温脱離法、拡散の計算機シミュレーションなどにより、各条件下における材料中の水素の侵入・移動経路、水素侵入量、水素の状態の考察を行った。

その結果、水蒸気分圧制御大気環境下と高圧水素ガス環境下での試験結果を比較することにより、70MPa 水素ガス環境は相対湿度約 25%の環境に相当する考えられた。水素の挙動を昇温脱離分析により基礎的に調査した結果、湿潤大気環境下で SSRT 引張変形することにより、水素が侵入すると考えられた。強度、耐水素脆化性、LBB 性を総合的に評価した結果、6061 合金よりも過剰 Si 組成として高強度化した合金が、多くの 6000 系・7000 系合金の中でライナー材として有望であると結論された。それを受けて、それに当たる試験材 6061HS-T651 を量産規模で作製し、JRCM グループの協力による 90MPa 高圧水素中での試験を始めとして、必要特性の評価を実施した。そして評価結果を平成 22 年 3 月の新例示基準策定に資するデータとして関係機関に提供し、意見公募実施に大きく貢献した。

表Ⅲ2.3(3)-1 各種アルミニウム合金試験材の作製及び組織と機械的特性の調査分担

	試験材	加工形態	材料パラメータ	担当
平成 17 年	6000 系合金	押出	合金組成(Mg/Si)、不純物量、微量添加元素等	三菱アルミ
		圧延	結晶粒径、微量添加元素等	日本軽金属
			合金組成(高 Mg・Si、Cu 増減)、結晶粒径、板厚等	古河スカイ
		素材	微量添加元素、熱処理等	日本アルミニウム協会／千葉工業大学

度	7000系合金	押出・圧延	7050合金・7N01合金標準材、熱処理等	神戸製鋼所
		接合継ぎ手	—	昭和電工
	5000系合金	接合継ぎ手	—	昭和電工
18年度	6000系合金	押出	合金組成、温度・加工度等	住友軽金属
	7000系合金	押出・圧延	合金組成、結晶粒径等	神戸製鋼所
		圧延	結晶粒径、微量添加元素等	日本軽金属
			合金組成(Zn,Cu,Mn)、結晶粒径等	古河スカイ
19年度	高強度 6000系合金	圧延	6066-T6合金等高強度 6000系合金の板厚 1mm材および 5mm材	日本軽金属
	7000系合金	圧延	7175,-T736,7075-T736, 7N01-T5,T6,T7, 7003-T5,T6,T7合金の板厚 1mm材および 5mm材 (7N01 および 7003合金については、中心組成および上限組成)	神戸製鋼所

表Ⅲ2.3(3)-2 試験項目と試験実施分担（平成17年度～平成19年度）

試験項目		試験実施担当
SSRT 引張試験	(1)水蒸気分圧制御下 SSRT [板厚 1mm] [平滑・表面欠陥(切欠き)] (社)日本自動車工業会要請材料)	日本アルミニウム協会／山口大学との共同実施 日本アルミニウム協会／千葉工業大学（再委託） 古河スカイ(株) (日本軽金属、三菱アルミニウム、神戸製鋼所、昭和電工)
	(2)水蒸気分圧制御下 SSRT [板厚：5mm]	日本アルミニウム協会／茨城大学との共同実施 (三菱アルミニウム)
	(2)陰極電解水素チャージ下 SSRT	神戸製鋼所
	(3)高圧水素ガス下 SSRT	日本アルミニウム協会／山口大学との共同実施
疲労試験（水蒸気分圧制御下） ((社)日本自動車工業会要請材料)		古河スカイ 日本アルミニウム協会／千葉工業大学（再委託） (日本軽金属、三菱アルミニウム、神戸製鋼所)
き裂進展抵抗評価試験 サイクル負荷によるき裂進展特性評価試験		日本アルミニウム協会／山口大学との共同実施
引裂き試験による靱性の評価 [板厚 5mm]		住友軽金属
水素の移動経路の解析 水素の侵入量の分析評価		日本アルミニウム協会／茨城大学との共同実施
容器ライナー加工時の結晶粒粗大化抑制試験		住友軽金属（押出材） 日本軽金属（圧延材） 日本アルミニウム協会／千葉工業大学（押出素材）

備考：試験実施担当欄の（ ）内の企業は、一部現地試験に従事するか、或いは自社作製の共通試験材の基本データと対比して試験後の破面観察や評価試験結果の解析・評価を行う。

表Ⅲ2.3(3)-3 試験項目と試験実施分担（平成20年度～平成21年度）

試験項目	試験実施担当
SSRT試験による水素脆化感受性評価 （水蒸気分圧と温度制御下）	日本アルミニウム協会／山口大学・茨城大学との共同実施 古河スカイ（株）（日本軽金属（株））
疲労試験（水蒸気分圧制御下）	日本アルミニウム協会／千葉工業大学（再委託） 古河スカイ（株）（日本軽金属（株））
疲労き裂進展特性評価 （水蒸気分圧と温度制御下）	日本アルミニウム協会／山口大学との共同実施 （日本軽金属（株））
引裂試験による靱性評価	住友軽金属工業（株）
水素拡散挙動の理論解析	日本アルミニウム協会／京都大学との共同実施
疲労き裂進展速度と局所的水素濃度の解析	日本アルミニウム協会／大阪大学との共同実施
水素侵入量の分析評価	日本アルミニウム協会／茨城大学との共同実施
高圧水素容器ライナー材料の基本特性評価 《引張試験, 水素分析, 切欠特性, 耐食性試験, SSRT 試験（一部共通試料のスクリーニング評価）, 結晶粒組織観察》	日本軽金属（株）,（株）神戸製鋼所, 住友軽金属工業（株）, 古河スカイ（株） 三菱アルミニウム（株）

表Ⅲ2.3(3)-4 成果表

目標	研究開発成果	達成度
①水素用アルミニウム材料の試験結果の評価とデータベース化及び研究開発の展開方針の検討と関連業界団体等との連携	「水素用アルミ材料の基礎研究推進委員会」及び「水素用アルミ材料の基礎研究調整 WG」を開催し、研究計画の調整、進捗状況のチェックなどを行った。データ取得の主体である水蒸気分圧制御下での水素脆化感受性の試験条件、及び水素の侵入・移動経路の観察条件について協議し、高圧水素環境下での試験結果との比較を通して、何れも試験条件として適切であることを確認した。また、社団法人日本自動車工業会の圧縮水素容器 WG をはじめ、JRCM、高圧ガス保安協会など関連団体との連携を図ることにより、70MPa 対応例示基準の作成に資するデータを蓄積することができた。	達成
②6000系アルミニウム合金の水素脆化に及ぼす結晶粒微細化添加元素の影響調査	6000系アルミニウム合金組織の結晶粒微細化添加元素の影響調査では、最も結晶粒が微細化した Zr 添加した合金では、水素脆化を示さないことを SSRT 試験によって明らかにした。高強度 6000 系合金の	達成

<p>研究ならびに高強度 6000 系合金の疲労特性調査研究</p>	<p>疲労特性調査研究では、高湿度・低湿度試験雰囲気下で疲労試験を行い、6061, 6066 及び 6069 合金の疲労寿命は低湿度下と比べて高湿度下では短くなっていること、しかしより高強度の 6066 及び 6069 合金の高湿度下での疲労寿命は、6061 合金とほとんど同等かそれ以上であることを確認した。3 合金の疲労破面において、高湿度下では低湿度下より多数の割れが観察でき、湿度が疲労亀裂頻度に大きく影響することが明らかにすることができた。6061 合金の高湿度下 (95%R.H. 以上) において応力振幅 ; 110, 150MPa、周波数 ; 0.5, 5, 50Hz の条件で試験を実施し、周波数が低下するほど疲労寿命が減少する傾向であることを明らかにした。高湿度雰囲気下での 6061 合金の SSRT 試験では、応力集中させるために円弧状ノッチ、V ノッチを付与したいずれの試験片においても、高湿度下の断面減少率は低湿度下のそれより大となる事が示された。このことは 6061 合金の高湿度下 SSRT において、水素による延性増加の存在を裏づけるものと考えられる。そして、6061 合金組成範囲で Si を増大させた 6061HS 合金では SSRT 試験 (V ノッチを付与した試験片) で水素脆化することは無く、断面減少率の差が 1%程度であることを確認した。さらに 6061HS 合金の疲労試験では 6061 合金より疲労寿命が延命し、目標値を確保していることを確認した。また転位組織に著しい差異が無いことを確認された。</p>	
<p>③水素脆化および水素移動経路に及ぼす板厚,合金組成,加工,熱処理条件の影響調査研究ならびに材料中の水素挙動調査研究</p>	<p>水素脆化に及ぼす試験片板厚の影響では、板厚増加に伴い、応力 3 軸度増加の影響(脆化促進要因)よりも、水素拡散深さの相対減少の効果(脆化軽減要因)のほうが強く表れることを明らかにした。7075 合金の水素の移動経路に及ぼす合金組成 (不純物量)、加工履歴 (回復・再結晶の程度)、調質条件 (T6 (ピーク時効)と T7(過時効) の差) の影響では、不純物量が少ないほど、回復・再結晶が進展していないほど、ピーク時効より過時効の場合のほうが、水素が侵入・移動しにくいことを明らかにした。調質条件については水素脆化挙動に及ぼす影響も調査し、応力腐食割れに対する感受性と同様に、亜時効が最も敏感で、ピーク時効、過時効の順に鈍感になることを明らかにした。湿潤雰囲気中で引張変形を与えることにより導入される水素の挙動では、水素が晶出第二相をサイトとして侵入する一方で、もともと材料中に存在していた不純物水素が変形により、転位とともに移動し外部に放出されるため、水素量の変化により捉えることが困難であることを明らかにした。6066, 6069M, 6061HS などの 6000 系新規試験材の耐水素脆化性を湿潤雰囲気中での SSRT 試験により評価し、脆化をほとんど示さないと結論した。マイクロプリント法の検出効率の改善では、効率に及ぼすイオンプレーティング(IP)処理</p>	<p>達成</p>

	の影響を調べたが、IPにより検出効率が高くなるのか、IPにより他の要因の水素が検出されやすくなるのか結論できなかった。材料中の水素の挙動の総合解析では、脆化に関与する水素は晶出第二相などをサイトとして侵入するが、侵入量はもともと存在する不純物水素量に比べて少なく、き裂先端に集中して存在すると推察した。	
④SSRT試験による水蒸気分圧制御環境下および高圧水素ガス環境下における水素脆化感受性の評価ならびに水素脆化評価簡便試験法の標準化研究ならびに疲労き裂進展特性評価研究	SSRT試験による水素脆化感受性評価試験では、主として6061-T6と7075-T6材について水素脆化感受性に及ぼす高湿度空気と高圧水素ガスの影響を調査し、前者環境が後者を超える厳しい水素脆化環境であることを明らかにした。次いで、前者環境中のSSRT特性に及ぼす表面欠陥(切欠き)、結晶粒サイズ、試験温度の影響を調査し、両材における各脆化応答と特徴、6061-T6は上記影響因子に依らず脆化に非鋭敏であることを明らかにした。併せて、7075-T6のSSRT試験中断・放置による脆化・回復挙動を調査し、水素脆化過程の考察を行った。また、中強度7000系合金7N01、7003について水素脆化感受性に及ぼす合金組成、調質の影響を調べ、良好な水素脆化抵抗と強度の組合せを見出し、マイクロ組織との関係を明らかにした。疲労き裂進展特性評価試験では7000系および6000系合金各種調質材の疲労き裂進展速度 $da/dN-\Delta K$ 特性および乾燥窒素ガスに対する高湿度空気中の da/dN 増速比の評価ならびに高圧水素ガス環境、温度、周波数の影響を調査し、各応答特性を明らかにした。さらに、高湿度空気-長時間暴露による水素脆化評価試験では強化6061HS合金および各種7000系合金厚板の水素脆化割れ応答を調べ、7000系合金T7材および6061HS-T6材はその発生がなく、高い水素脆化割れ抵抗を有することを示した。	達成
⑤拡散シミュレーションによる多相組織中の水素拡散に及ぼす組織因子の明確化	現象論的なパラメータとして複数の種類のサイト(バルク、粒界など)のそれぞれに異なった分配係数と拡散定数を割りつけて拡散方程式を解く、組織因子の影響を定性的に確認するプログラムを作成し、バルク拡散と粒界拡散、吸着の強度変化によるふるまいの違いを調べた。	達成
⑥水素導入環境での疲労特性評価および水素吸放出特性のミクロ的解析	6061および7075合金に対して高湿度大気環境から水素を導入した後の疲労特性の調査を行い、疲労変形時の水素放出挙動を質量分析計付き超高真空材料試験機で計測した。疲労変形時の水素放出が応力変動と連動すること、周波数によって放出量が変化すること、などを示した。	達成
⑦6061系アルミニウム合金押出材の水素脆化に及ぼす粗大結晶粒の影響調査および	6061系アルミニウム合金押出材について容器ライナー加工時の結晶粒粗大化を抑制するため、加工条件と溶体化処理後の結晶粒組織の影響を調査した。結晶粒組織に及ぼす加工度と加工温度およびひず	達成

<p>び容器ライナー加工時の結晶粒粗大化抑制指針の検討ならびに高強度試験材の引裂試験による靱性の評価</p>	<p>み速度の影響から結晶粒の粗大化を抑制する加工条件を得ることができた。また、容器ライナーの候補となる高強度試験材の靱性を引裂試験によって評価した。破壊靱性の指標となる単位き裂伝播エネルギー(UIE)は 6061-T6、7003-T5、7003-T6 が大きいことがわかった。ただし、ライナー用の高強度材料選定に当たっては破面観察等の結果も考慮する必要があることも確認した。さらに、6066-T6 で鉄量を変化させて破壊靱性に及ぼす鉄量の影響を引裂試験によって評価した。最大試験力、き裂発生エネルギー、き裂伝播エネルギー、引裂強さ、引裂強さ-降伏強さ比(TYR)、単位き裂発生エネルギー(UIE)、単位き裂伝播エネルギー(UPE)、靱性(引裂試験)の評価に関するいずれの指標も鉄量の増加に伴って低下する傾向が有った。</p> <p>また、容器ライナー材の例示規定改定に向けて実機で 6061(過剰けい素側)-T651 を作製し、比較として実機で作製した 6061(バランス成分)-T6 と共に引裂試験で破壊靱性の評価を行った。破壊靱性の指標となる単位き裂伝播エネルギー(UIE)や引裂強さ-降伏強さ比(TYR)は 6061(バランス成分)-T6の方が大きく、6061 で過剰けい素側を選択する場合には破壊靱性も考慮する必要があることがわかった。</p>	
<p>⑧水素脆化に及ぼす 6000 系アルミニウム合金押出材の成分、不純物および組織の影響に関する研究</p>	<p>主成分 Mg,Si 添加量,不純物 Fe,Zn の量を変えた合金の押出材を 9 種類作製し、機械的性質,結晶粒組織,析出組織等を調べ,合金成分と不純物の影響を評価した。水蒸気雰囲気中での SSRT 試験による水素脆化の評価を行い、合金成分,不純物量の変動しても水素脆化は認められなかった。さらに、水素脆化の有無を厳しく評価するために 90% 相対湿度環境中での疲労寿命、特に低応力側の疲労寿命は、一部の合金においては、窒素環境中より若干低下する現象が認められた。晶出物粒子の多い合金については、この疲労寿命の低下はほとんど認められなかった。</p>	<p>達成</p>
<p>⑨水蒸気分圧制御環境と高圧水素ガス環境の相関についての基礎調査ならびに各種アルミニウム合金の水蒸気分圧制御環境下での試験</p>	<p>水蒸気分圧制御環境と高圧水素ガス環境の相関調査用の候補材料として、水素脆化感受性が異なる複数の 7000 系合金 (Al-Zn-Mg 合金および Al-Zn-Mg-Cu 合金の亜時効・ピーク時効・過時効材) を作製して、種々の湿度雰囲気中 SSRT 試験を実施して、相関調査に必要な基礎的データを収集するとともに、相関調査用の最適合金を選択した。また、共通試料である 7075 および 6061 合金について、水蒸気分圧制御環境下での疲労試験 (千葉工大と共同実施) および SSRT 試験 (山口大学と共同実施) を実施して、各種特性に及ぼす水素の影響を評価した (試験結果については、各研究機関にて総括する)。</p> <p>さらにこれまで本プロジェクトで得られた研究成果をドイツで開催された国際会議(ICAA-11)にて発表するとともに、関連分野における</p>	<p>達成</p>

	最新の技術を調査して、技術動向を把握した。	
⑩6000 系および 7000 系アルミニウム合金圧延材の水素脆化に及ぼす粗大結晶粒の影響調査および容器ライナー加工時の結晶粒粗大化抑制指針の検討ならびに高強度 6000 系合金試験材の作製と基本特性調査	6061 合金および 7075 合金について、高温圧縮試験を用いて容器ライナーの加工条件をシミュレートし、加工条件(温度・歪み速度)と結晶粒組織との関係について詳細な検討を行った。その結果、粗大粒が発生しない加工条件が明確になり、容器ライナー加工時の粗粒発生抑制指針を与えることができた。さらに、粗粒材・細粒材を作製し、水素模擬環境における特性を調査し、粗粒材は水素脆化する可能性があることがわかった。一方、6061 合金 J I S 規格範囲内の組成で過剰 Si を含有する高強度タイプの 6061HS 合金を実機試作し、90MPa 水素環境における特性を評価した結果、特性が良好であり、70MPa 水素容器例示基準作成のための基礎データが得られた。さらに、高強度の 6XXX 系合金板は、ラボ試作して基本特性を調査した結果、現行 6061 と比べ、静的引張強度・疲労強度は高く、今後の高強度ライナー材として期待される。	達成
⑪高圧水素ガス環境下での高強度 7000 系アルミニウム合金の基礎物性と評価法に関する研究ならびに高強度 7000 系合金試験材の作製と基本特性調査	高圧水素容器部材への材料選定範囲拡大を目的に、(社)日本自動車工業会より、7000 系合金規格材での特性調査要望があり、共通試料の作製、試験をグループ内で分担し進めた。高湿潤中環境下での SSRT 試験ならびに疲労試験、陰極電解中での SSRT 試験より、7N01(中心組成)は優れた脆化抵抗を示すことが判った。また、SSRT 試験のみではあるが、より高強度な 7175-T74 も高い抵抗を示した。高圧水素ガス中での各種特性試験の実施が必須となるが、これらは有力な候補材の一つになりうる材料と考える。一方、高強度 6000 系規格合金では、押出材で 6066-T6 ならびに 6061HS(Si 量規格上限値)-T6 を、また板材で 6066-T6 を作製し、高湿潤中環境下で SSRT 試験を行ったところ、これらは脆化に結びつく引張特性の低下を生じないことが判った。なお、6066-T6 板材を用いて、Fe 量が脆化感受性に及ぼす影響を調査したところ、規格上限値の Fe 量では、伸び値の低下、またそれらのバラツキは大きくなる傾向を示した。高圧水素ガス中での特性確認は必要ではあるが、特性の低下が生じるようであれば、Fe 量の規制も考慮する必要があるものとする。	達成
⑫各種アルミニウム合金の FSW (Friction Stir Welding : 摩擦攪拌溶接) 接合継ぎ手の作製及び接合部の水素の影響に関する研究	各種合金 (6000 系,5000 系,7000 系) の FSW 継手において、接合部の組織及び機械的性質に対する水素の影響を調査した。その結果、固相接合である FSW では、水素の影響は母材と同程度であり、接合技術として有効であることが確認できた。また、実際に加工したタンク (容器) を評価し組織的な状況も確認できた。	達成

添付資料

(1) 研究発表・講演

★は論文

発表年月 日	発表媒体	発表タイトル	発表者
平成17年 5月15日	軽金属学会第 108回春期大会 講演概要	6061 アルミニウム合金の疲労特性に 及ぼす試験湿度の影響	古河スカイ：一谷幸 司、小山克己
平成17年 5月15日	軽金属学会第 108回春期大会 講演概要	アルミニウム合金における水素透過 挙動に及ぼすマイクロ組織の影響	茨城大学：赤木隆 介、伊藤吾朗ほか
平成17年 5月15日	軽金属学会第 108回春期大会 講演概要	アルミニウム合金押出材における水 素透過挙動	茨城大学：遠山拓 史、伊藤吾朗ほか
平成17年 5月15日	軽金属学会第 108回春期大会 講演概要	アルミニウム合金における水素ガス 圧と水素透過挙動の関係	茨城大学：泉 孝 裕、伊藤吾朗ほか
平成17年 11月13 日	軽金属学会第 109回秋期大会 講演概要	アルミニウム合金における水素環境 における塑性誘起と破壊	山口大学：大崎修 平、池田 淳ほか
平成17年 11月13 日	軽金属学会第 109回秋期大会 講演概要	7075 アルミニウム合金の水素透過に 及ぼすマイクロ組織の影響	茨城大学：遠山拓 史、伊藤吾朗ほか
平成18年 1月25日	FC EXPO 2006 大 学・国立研究所 による研究フォー ラム	高圧水素ガス容器アルミニウムライ ナー材料に関する基礎研究	茨城大学：伊藤吾朗
★平成18 年2月28 日	軽金属学会誌「 軽金属」Vol.56 No.2 P.12	過剰Si型 Al-Mg-Si 合金の SCC 過程 における水素脆化の関与	山口大学：大崎修 平、近藤秀樹、木下 勝之
★平成18 年4月	Mater. Trans.	Contribution f Hydrogeon Embrittlement to SCC rocess in Excess Si Type Al-Mg-Si Alloys	S. Osaki, H. Kondo, K .Kinoshita
平成18年 5月14日	軽金属学会第 110回春期大会 講演概要	湿潤雰囲気中実用アルミニウム合金 における水素の挙動解析	阿島 亘、遠山 拓 史、泉孝裕、伊藤吾 朗、伊藤伸英、佐々 木侑慥

平成18年 5月14日	軽金属学会第 110回春期大会 講演概要	6061 アルミニウム合金押出材の水素 脆化感受性	三菱アルミ：中西茂 紀、崔 祺、坂上 武、渡部 晶 山口大学：大崎修平
平成18年 5月14日	軽金属学会第 110回春期大会 講演概要	5754-0、6061-T4 板材の 90%RH 環境 における引張挙動	日本軽金属：趙 丕 植、小林達由樹、土 田孝之 山口大学：大崎修平
平成18年 5月14日	軽金属学会第 110回春期大会 講演概要	6061 アルミニウム合金板の疲労特性 に及ぼす試験湿度の影響	古河スカイ： 一谷幸司、小山克己
★平成18 年6月	Materials Science Forum	Hydrogen permeation behavior in Aluminum alloys	T. Izumi, G. Itoh, N. Itoh, And Y. Sasaki
平成18年 9月19日	日本機械学会 2006年度年次大 会講演論文集	高湿度空気中におけるアルミニウム 合金の低ひずみ試験応答	大崎修平、池田 淳、木下 勝之、一 谷幸司、竹島義雄、 佐々木 侑慥
平成18年 10月	Proceedings of The 2nd International Student Conference At Ibaraki University	EFFECT OF SPECIMEN THICKNESS ON SENSITIVITY TO HYDROGEN EMBRITTELEMENT IN SOME ALUMINUM ALLOYS	T. Izumi, Y. Arai, G. Itoh, S. Osaki, N. It oh and T. Inami
平成18年 11月18 日	軽金属学会第 111回秋期大会 講演概要	水素容器ライナー用 6061 合金の結晶 粒組織に及ぼす加工条件、Cr、Zr 含 有量の影響	日本軽金属：趙 丕 植、小林達由樹、土 田孝之
平成18年 11月18 日	軽金属学会第 111回秋期大会 講演概要	湿潤大気中アルミニウム合金におけ る水素進入挙動	鹿川隆廣、鈴木智 弥、泉 孝裕、伊藤 吾朗、伊藤伸英、佐 々木侑慥
平成18年 11月18 日	軽金属学会第 111回秋期大会 講演概要	湿り空気中のアルミニウム合金切欠 き板の水素助長割れ	大崎修平、池田 淳、木下 勝之、一 谷幸司、竹島義雄、

			佐々木 侑髄
平成18年 11月18日	軽金属学会第 111回秋期大会 講演概要	水素環境における6061-T6板材の SSRT引張特性に及ぼす結晶粒サイズ の影響	原野 徹、大崎 修 平、木下勝之、趙 丕植、竹島 義雄、 佐々木 侑髄
★平成18 年12月	軽金属	湿潤空気中における7075および6061 アルミニウム合金の水素脆化特性	大崎 修平、池田 淳、木下 勝之、佐 々木 侑髄
平成18年 12月	イノベーション ジャパン2006	高圧水素容器用アルミニウム合金の 水素脆化感受性評価試験法	伊藤 吾朗
平成19年 1月	未来を拓く高圧 力科学技術セミ ナーシリーズ	燃料電池自動車搭載圧縮水素容器ラ イナー用アルミニウム材料	伊藤 吾朗
★平成19 年2月	軽金属	湿潤空気中におけるアルミニウム合 金切欠き板材の水素脆化特性	大崎 修平、池田 淳、木下 勝之、一 谷幸司、竹島義雄、 佐々木 侑髄
平成19年 5月12日	軽金属学会第 112回春期大会 講演概要	6061アルミニウム合金の低ひずみ速 度 引張変形挙動に及ぼす湿潤空気環境 の 影響	大崎 修平、池田 淳、原野 徹、一谷 幸司、趙 丕植、竹 島 義雄
平成19年 5月12日	軽金属学会第 112回春期大会 講演概要	6000系アルミニウム合金板の雰囲気 湿度制御環境中での疲労破面形態	古河スカイ：一谷 幸司、小山 克己
平成19年 5月12日	軽金属学会第 112回春期大会 講演概要	水素容器ライナー7075合金の結晶粒 組織に及ぼす加工条件、CrとZr含 有量 の影響	日本軽金属：趙 丕 植、小林達由樹、 土田 孝之
平成19年 5月12日	軽金属学会第 112回春期大会 講演概要	水蒸気環境中での6061系アルミニウ ム 合金押出材の疲労挙動	三菱アルミ：中西茂 紀、崔 祺、坂上 武渡部 晶、古河ス カイ：一谷 幸司
平成19年 5月12日	軽金属学会第 112回春期大会 講演概要	昇温脱離法による中強度アルミニウ ム合金中の水素の解析	茨城大学：伊藤吾 朗、鈴木智弥、泉孝 裕、伊藤伸英、三菱

			アルミ：崔 祺、他
平成19年 7月13日	(社)日本航空 宇宙工業会素材 専門委員会	アルミニウム合金の水素脆性—燃料 電池自動車水素容器ライナー材に関 する最近の研究成果	茨城大学：伊藤吾朗
平成19年 10月5日	静岡燃料電池技 術研究会	燃料電池自動車の高圧水素ボンベラ イナー用アルミニウム合金の基礎研 究	日本軽金属：趙 丕 植、小林達由樹、 土田 孝之
平成19年 10月24 日	Proceedings of The 5 th International Conference on Physical and Numerical Simulation of Materials Processing At Zhengzhou, Chin a	Effect of Fabrication Conditions and Cr, Zr Contents on the Grain Structures of 7075 and 6061Alloy	Pizhi Zhao, Takayuki Tsuchida
平成19年 10月26 日	軽金属学会中国 四国支部 2007 年度第2回研究 会	アルミニウム合金の高圧水素分野へ の応用	茨城大学：伊藤吾朗
平成19年 11月7日	The 6th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and Processing	Behavior of Hydrogen as a Function of Processing Condition in 7075 Aluminum Alloys Deformed under Moist Air	Goroh Itoh, Yuichi Arai, Takahiro Izumi Nobuhide Itoh, Takao Inami
平成19年 11月7日	The 6th Pacific Rim International Conference on Advanced Materials and	THERMAL DESORPTION SPECTROSCOPY STUDY ON THE HYDROGEN	Goroh Itoh, Tomoya Suzuki, Takahiro Izumi, Nobuhide Itoh, Qi Cui, Shuuhei Horikawa and Hitoshi Yabuta

	Processing		
平成19年 11月10日	軽金属学会第 113回秋期大会 講演概要	7075 アルミニウム合金中の水素挙動 に 及ぼす調質条件の影響	茨城大学：伊藤吾朗 荒井優一、五十嵐駿 泉 孝裕、伊藤伸英
平成19年 11月10日	軽金属学会第 113回秋期大会 講演概要	6061 アルミニウム合金における水素 の存在状態に及ぼす塑性加工の影響	茨城大学：伊藤吾朗 鈴木智弥、渡壁尚仁 泉 孝裕、伊藤伸英 藪田 均
平成19年 11月11日	軽金属学会第 113回秋期大会 講演概要	6061 アルミニウム合金の疲労き裂進展 挙動に及ぼす湿潤空気環境の影響	山口大学：大崎修平 原野 徹
平成19年 11月11日	軽金属学会第 113回秋期大会 講演概要	水素容器ライナー用 6061 と 7075 合 金 板の疲労特性に及ぼす結晶粒径の影響	日本軽金属：趙丕植 小林達由樹、住友軽 金属 竹島義雄、古 河スカイ 一谷幸 司
★平成20 年1月	軽金属	7075 系アルミニウム合金における水 素挙動に及ぼすマイクロ組織の影響	茨城大学：伊藤吾 朗、泉孝裕、遠山拓 史
平成20年 3月7日	日本機械学会 中国四国支部 第46期総会・ 講演会	高湿度空気中における 6000 系アルミ ニウム合金の疲労き裂進展	山口大学：大崎修平 原野 徹 日軽金：趙 丕植
★平成20 年4月	軽金属	6061 アルミニウム合金の水素脆化特 性 に及ぼす結晶粒サイズの影響	山口大学：大崎修平 原野 徹、池田 淳 古河スカイ：一谷 幸司 日軽金：趙 丕植、住友軽金属 竹島 義雄
★平成20 年4月	軽金属	6061 アルミニウム合金の結晶粒度に 及ぼす熱間加工条件および Cr と Zr 含有量の影響	日本軽金属：趙丕 植、小林達由樹、土 田孝之
平成20年 5月10日	軽金属学会第 114回春期大会 講演概要	6061 合金押出材の疲労挙動に及ぼす 合金成分と試験環境の影響	三菱アルミ：中西茂 紀、崔祺 古河スカイ：一谷幸

			司
平成20年 5月10日	軽金属学会第 114回春期大会 講演概要	A1-Mg-Si系アルミニウム合金の疲 労挙動に及ぼす湿度の影響	千葉工大：田辺郁， 茂木徹一，菅野幹 宏， (院)青木翼
平成20年 5月10日	軽金属学会第 114回春期大会 講演概要	各種二元および三元アルミニウム合 金の湿度制御雰囲気中での低ひずみ 速度引張 特性	古河スカイ：一谷幸 司，小山克己 山口大学：大崎修平 原野 徹
平成20年 5月10日	軽金属学会第 114回春期大会 講演概要	高強度6000系合金における水素の存 在状態に及ぼすSSRT引張変形の影響	茨城大学：伊藤吾 朗，(院)鈴木智弥， (学)渡壁尚仁，五 十嵐駿 日本軽金属：趙丕植
平成20年 5月10日	軽金属学会第 114回春期大会 講演概要	高圧水素ガス中における7075および 6061アルミニウム合金のSSRT特性	山口大学：大崎修 平，(院)前田悦宏， 木下 勝之 古河スカイ：一谷幸 司 茨城大学：伊藤吾朗
平成20年 5月10日	軽金属学会第 114回春期大会 講演概要	純アルミニウムにおける水素の侵 入・放出挙動に及ぼすイオンプレー ティング処理の影響	茨城大学：伊藤吾 朗， (学)中津巖，(院) 鹿川隆廣，(院)泉 孝裕，伊藤伸英
平成20年 5月10日	軽金属学会第 114回春期大会 講演概要	7075アルミニウム合金への水素の侵 入挙動に及ぼす調質条件の影響	茨城大学：伊藤吾 朗， (院)荒井優一， (学)五十嵐駿，伊 藤伸英 日本アルミ協会： 藪田 均
平成20年 5月10日	軽金属学会第 114回春期大会 講演概要	湿度制御によるアルミニウム合金の 水素 脆性評価における試験湿度と水素ガ	古河スカイ：一谷幸 司，小山克己 茨城大学：伊藤吾朗

		ス圧の相関	山口大学：大崎修平
平成20年 5月11日	軽金属学会第 114回春期大会 講演概要	水素容器ライナー用高強度6000系アルミニウム合金の組織と特性	日本軽金属：趙丕植，平山智将，土田孝之
平成20年 9月23日 研究発表	ICAA11 11 th International Conference On Aluminium Alloys	Effect of Humidity in Air on Fatigue Behavior of Al-Mg-Si alloys	Fumi Tanabe, Tesuichi Motegi, Motohiro Kanno, Hitoshi Yabuta
★平成20 年9月	Proceedings of the 11 th International Conference On Aluminium Alloys.	Effect of Humidity in Air on Fatigue Behavior of Al-Mg-Si alloys	Fumi Tanabe, Tesuichi Motegi, Motohiro Kanno, Hitoshi Yabuta
★平成20 年9月	軽金属、第58巻 第9号(2008) 456-461	6061 アルミニウム合金の湿潤空気中における疲労き裂進展特性	山口大学：大崎修平 (院) 原野 徹 藪田 均
平成20年 9月	日本機械学会	湿潤大気中での変形によるアルミニウム合金への水素侵入挙動	茨城大学：伊藤吾朗 荒井優一、永安明、伊藤伸英、藪田均
平成20年 9月	日本機械学会	6000系アルミニウム合金中の水素挙動に及ぼす引張変形の影響	茨城大学：伊藤吾朗 河金 慧、鈴木智弥 伊藤伸英、藪田 均
平成20年 9月22日	11 th International Conference on Aluminum Alloys	Slow strain rate tensile properties of Several kinds of aluminum alloys under Controlled experimental humidity	古河スカイ：一谷幸司，小山克己 山口大学：大崎修平 原野 徹
平成20年 9月22日	11 th International Conference on Aluminum Alloys	Effect of environmental hydrogen on impact tensile properties of 6061 and 7075 aluminum alloys	大阪大学：堀川敬太郎，(院) 山田浩之， (院) 谷垣健一，小林秀敏

平成20年 9月22日	11 th International Conference on Aluminum Alloys	Behavior of Hydrogen in Aluminum Alloy Affected by Alloy Composition and Deformation.	G. Itoh, T. Suzuki, T. Watakabe, N. Itoh,
平成20年 9月25日	11 th International Conference on Aluminum Alloys	Amount of Hydrogen in a 7075 Aluminum Alloy with Different Tempers.	G. Itoh, Y. Arai, S. Igarashi, N. Itoh , H. Yabuta
平成20年 11月15日	軽金属学会第 115回秋期大会 講演概要	低ひずみ速度引張変形による6000系アルミニウム合金への水素の侵入	茨城大学：伊藤吾朗，鈴木智弥，河金慧，伊藤伸英 日本アルミ協会： 藪田均
平成20年 11月16日	軽金属学会第 115回秋期大会 講演概要	湿潤雰囲気中での変形による6061および7075アルミニウム合金への水素侵入挙動	茨城大学：伊藤吾朗 荒井優一、永安明、 伊藤伸英
平成20年 11月16日	軽金属学会第 115回秋期大会 講演概要	高湿度空気中における中強度7000系アルミニウム合金の水素脆化特性	山口大学：大崎修平，(院)前田悦宏 (元学)森田到 神戸製鋼：中井学
平成20年 11月16日	軽金属学会第 115回秋期大会 講演概要	6061および7075アルミニウム合金の衝撃変形中の水素集積の可視化	大阪大学：堀川敬太郎 (院)山田浩之 (院)谷垣健一 渡辺圭子、小林秀敏
平成20年 11月16日	軽金属学会第 115回秋期大会 講演概要	アルミニウムでの水素マイクロプリント 検出に及ぼすイオンプレーティング条件 の影響	茨城大学：伊藤吾朗 (院)鹿川隆廣 鈴木佑得、中津巖 伊藤伸英
平成20年 11月16日	軽金属学会第 115回秋期大会 講演概要	Al-Mg-Si系合金のノッチ付試験片を用いた低歪速度引張試験	千葉工業大学：茂木徹一、田辺郁、菅野基宏(院)青木翼、

平成21年 1月	Material Science and Engineering A499, P. 78-82	Effect of fabrication conditions and Cr, Zr contents on the grain structures of 6061 and 7075 aluminum alloys.	P. Z. Zhao, T. Tsuchida
★平成21 年3月	日本機械学会 論文集 A 編、第 75 巻 751 号 (2009), 366-372.	高圧水素ガス中におけるアルミニウム合金 7075 および 6061 の脆化特性	山口大学：大崎修平，(院) 前田悦宏，木下勝之，古河スカイ：一谷幸司，茨城大学：伊藤吾朗
平成21年 3月7日	日本機械学会関東支部第15期総会講演会講演論文集	水素マイクロプリント法によるアルミニウム中の水素の可視化——検出効率に及ぼす試料表面イオンプレATING処理の影響	茨城大：伊藤吾朗，(院) 鹿川隆廣
平成21年 3月7日	日本機械学会関東支部第15期総会講演会講演論文集	水素燃料電池自動車用アルミニウム合金	茨城大：伊藤吾朗
成21年4 月1日	Furukawa-Sky Review No. 5	湿度制御雰囲気中におけるアルミニウム合金の低ひずみ速度引張り変形特性	古河スカイ：一谷幸司，小山克己
平成21年 5月21日	軽金属学会第116回春期大会講演概要	イオンプレATINGしたアルミニウムからの水素放出挙動に及ぼす被膜組織の影響	茨城大：伊藤吾朗，(院) 鹿川隆廣，(学) 鈴木佑得，(院) 中津巖，伊藤伸英
平成21年 5月21日	軽金属学会第116回春期大会講演概要	高湿度空気中における 6061 および 7075 アルミニウム合金の疲労き裂進展特性に及ぼす周波数の影響	山口大学：大崎修平，(院) 前田悦宏，日本アルミ協会 藪田 均
平成21年 5月22日	軽金属学会第116回春期大会講演概要	環境水素の影響を受けた 6061 および 7075 アルミニウム合金からの水素放出挙動	大阪大学：山田浩之，松本武史，堀川啓太郎 小林秀敏
平成21年 5月22日	軽金属学会第116回春期大会	6000系アルミニウム合金の雰囲気湿度制御環境中での疲労特性に及ぼす	古河スカイ：一谷幸司，小山克己

	講演概要	添加元素の影響	
★平成 21 年 7 月	軽金属、第 59 巻 7 号 (2009)、 407-411.	アルミニウム材料の水素環境助長割 れの 破壊様相と感受性の制御	山口大学：大崎修 平
平成 21 年 8 月 25 日	2009 日本機械学 会茨城講演会	高 Si 組成の 6061 アルミニウム合金 の耐水素脆化特性	茨城大学：伊藤吾 朗，(学) 黒柳和弥， (院) 渡辺雅貴 日本軽金属：趙丕植
平成 21 年 8 月 25 日	2009 日本機械学 会茨城講演会	イオンプレーティング処理を施した 純アルミニウムの引張変形中の水素 の挙動解析	茨城大学：伊藤吾 朗，(学) 岩橋秀樹， (院) 鹿川隆廣，伊 藤伸英
平成 21 年 8 月 26 日	THERMEC' 2009 (6th International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials)	Behavior Of Hydrogen In Aluminum-Based Materials.	Goroh Itoh
平成 21 年 8 月 27 日	THERMEC' 2009 (6th International Conference on Processing and Manufacturing of Advanced Materials)	Analysis On The Behavior Of Hydrogen In Ion-plated Pure Aluminum By Means Of Thermal Desorption Spectroscopy.	T. Sikagawa, G. Itoh, Y. Suzuki, I. Nakatsu, N. Itoh
平成 21 年 11 月 15 日	軽金属学会第 117 回秋期大会 講演概要	高圧水素貯蔵用 6061 アルミニウム合 金の機械的特性に及ぼすひずみ速度 の影響	大阪大学：山田浩 之，渡辺剛史，堀川 啓太郎 渡辺剛史，小林秀敏
平成 21 年 11 月 15 日	軽金属学会第 117 回秋期大会 講演概要	高湿度空气中長時間暴露によるアル ミニウム合金の水素環境助長割れ特 性評価	山口大学：大崎修 平，(院) 前田悦宏， 日本アルミ協会

			藪田 均
平成21年 11月15日	軽金属学会第 117回秋期大会 講演概要	高湿度空気中におけるアルミニウム合金のSSRT試験応答に及ぼす温度の影響	山口大学：大崎修平，(院)中島優太郎， 古河スカイ：一谷幸司
平成21年 11月15日	軽金属学会第 117回秋期大会 講演概要	6061および7075アルミニウム合金の疲労変形，破壊時の水素放出挙動	大阪大学：山田浩之，渡辺剛史，堀川啓太郎 渡辺剛史，小林秀敏
平成21年 11月15日	軽金属学会第 117回秋期大会 講演概要	高Si組成の6061アルミニウム合金における耐水素脆化特性および水素挙動	茨城大学：伊藤吾朗 (院)渡邊雅貴 (学)黒柳和也 日本軽金属：趙丕植
★平成21年 11月	日本機械学会論文 集A編、第75 巻752号(2009)	環境水素の影響を受けた6061, 7075アルミニウム合金の衝撃引張特性	大阪大学：(院)山田浩之，堀川敬太郎，(院)谷垣健一， 小林秀敏
平成21年 12月12日	International Symposium, “Processing and Fabrication of Advanced Materials XVIII”	Research on Aluminum Alloys for High-pressure Hydrogen Container in Japan.	G. Itoh, H. Yabuta

平成21年 12月12日	International Symposium, “Processing and Fabrication of Advanced Materials XVIII”	Interpretation of Hydrogen Peaks in the Thermal Desorption Spectra of Pure Aluminum.	G. Itoh, T. Izumi
平成21年 12月12日	International Symposium, “Processing and Fabrication of Advanced Materials XVIII”	Effect of Si Content on the Resistance to Hydrogen Embrittlement in 6061 Aluminum Alloys.	G. Itoh, M. Watanabe, K. Kuroyanagi, P. Z. Zhao
平成21年 12月12日	International Symposium, “Processing and Fabrication of Advanced Materials XVIII”	Effect of humidity on the results of SSRT and Fatigue of an A6061 alloy.	Fumi Tanabe, Motohiro Kanno, Tetsuichi Motegi
平成21年 12月12日	International Symposium, “Processing and Fabrication of Advanced Materials XVIII”	Analysis on the Behavior of Hydrogen in Ion-plated Aluminum Foil by Means of Thermal Desorption Spectroscopy and Hydrogen Micro-print Technique.	G. Itoh, T. Sikagawa, Y. Suzuki, I. Nakatsu, N. Itoh

平成21年 12月12日	International Symposium, “Processing and Fabrication of Advanced Materials XVIII”	Technology in the VH3 Hydrogen Gas Cylinder for Fuel Cell Vehicles.	T. Takehana, G. Itoh
平成21年 12月12日	International Symposium, “Processing and Fabrication of Advanced Materials XVIII”	Microstructures and properties of high strength 6XXX series aluminum alloy sheets for hydrogen gas container liners.	P. Z. Zhao, T. Hirayama, T. Tsuchida, F. Tanabe, S. Osaki, G. Itoh
平成21年 12月13日	International Symposium, “Processing and Fabrication of Advanced Materials XVIII”	The Fracture Features of Hydrogen Environmental Assisted Cracking of Aluminum Alloys and Control of Sensitivity to the Cracking	Koji Ichitani and Shuhei Osaki
平成21年 12月13日	International Symposium, “Processing and Fabrication of Advanced Materials XVIII”	Visualization of Hydrogen during Tensile or Fatigue Deformation of Aluminum Alloys	Keitaro Horikawa, Hiroyuki Yamada and Hidetoshi Kobayashi

★平成 22 年 1月	軽金属、第 60 巻 1号 (2010)	高湿度空気中における中強度 7000 系 アルミニウム合金の水素脆化特性	山口大学：大崎修平，(院) 前田悦宏， (学) 森田到，神鋼：中井学，日本アルミ協会：藪田均
平成 22年 3月	日本機械学会 中国四国支部 第 48 期講演論 文集	高湿度空気中の 7000 系アルミニウム 合金の疲労き裂進展特性	山口大学：大崎修平， (院) 前田悦宏，木下 勝之，日本アルミ： 藪田均

(2) 特許等

番号	出願者	出願番号	国内 外国	出願日	状態	名称	発明者
1	古河スカイ(株)	特願 2007-189277	国内	2007.7.20	出願	貯蔵容器用合金	小山 克己 他
2	(株)神戸製鋼所	特願 2008-36755	国内	2008.2.19	出願	クラッド材	中井 学 他
3	古河スカイ(株)	特願 2008-69683	国内	2008.3.18	出願	容器用合金	小山 克己 他

(3) 受賞実績

千葉大学（千葉市）西千葉キャンパスで千葉大学広橋光治教授実行委員長主催での軽金属学会第 113 回秋期大会で優秀ポスター賞を受賞。

題目 “6061 アルミニウム合金における水素の存在状態に及ぼす塑性加工の影響”

発表者 茨城大学大学院 鈴木智弥

共著者 茨城大学 伊藤吾朗，(学)渡壁尚仁，(院)泉 孝裕，伊藤伸英
日本アルミニウム協会 藪田 均

愛媛大学（松山市）城北キャンパス共通教育棟で愛媛大学仲井清眞教授実行委員長主催での軽金属学会第 114 回春期大会で優秀ポスター賞を受賞。

題目 “Al-Zn-Mg 合金の低ひずみ速度引張特性に及ぼす試験雰囲気の影響：湿度制御大気と高圧水素ガス”

発表者 古河スカイ(株) 一谷幸司 小山 克己

共著者 茨城大学 伊藤吾朗

山口大学 大崎 修平

日本アルミニウム協会 藪田 均

工学院大学（新宿区）新宿キャンパス高層棟で工学院大学丹羽直毅教授実行委員長主催での軽金属学会第115回秋期大会で優秀ポスター賞を受賞。

題目 “低ひずみ速度引張変形による6000系アルミニウム合金への水素の侵入”

発表者 茨城大学大学院 鈴木智弥

共著者 茨城大学 伊藤吾朗, (学)河金 慧, 伊藤伸英

日本アルミニウム協会 藪田 均

東北大学（仙台市）片平キャンパス内さくら会館で東北大学新家光雄教授実行委員長主催での第18回PFAM国際会議（The 18th International symposium on Processing and Fabrication of Advanced Materials）でBEST POSTER AWARDを受賞。

題目 “Effect of Humidity on the Results of SSRT and Fatigue of an A6061 Alloy”

発表者 千葉工業大学 田辺 郁

共著者 千葉工業大学 菅野幹宏, 茂木徹一

東北大学（仙台市）片平キャンパス内さくら会館で東北大学新家光雄教授実行委員長主催での第18回PFAM国際会議（The 18th International symposium on Processing and Fabrication of Advanced Materials）でBEST POSTER AWARDを受賞。

題目 “Analysis on the Behavior of Hydrogen in Ion-plated Aluminum Foil by Means of Thermal Desorption Spectroscopy and Hydrogen Micro-print Technique.”

発表者 茨城大学大学院 鹿川隆廣

共著者 茨城大学 伊藤吾朗, (学)鈴木祐得, (院)中津 巖, 伊藤伸英

(4) 水素基礎物性の研究（実施体制：(財)エネルギー総合工学研究所、三菱重工業(株)）

① 水素の拡散・燃焼挙動の研究（実施担当：(財)エネルギー総合工学研究所）

a. 円筒状半閉鎖空間での水素の拡散・燃焼挙動の研究

ア. 実験設備

図 2.3(4)①a-1 に示すような鋼鉄製のダクト(2.4mΦ x 74m)を使用して、トンネル内を模擬した水素燃焼実験を実施した。ポリエチレンシートを用いてダクト中央に一定濃度の水素空気混合気を保持し電気スパークで着火する場合（水素均一濃度実験）と、ポリエチレンシートは用いず、ダクト中央に設置したノズルから水素を放出し着火（水素放出実験）する 2 通りの実験を行った。

ダクト内の側面には、内壁と同じ高さになるように 14 個の圧力計を設置した。ダクト両端部の外側には合計 4 個の圧力計を設置している。このうち 2 つは地面と同じ高さに設置され、残りの 2 つは、地面から 0.75m の高さに設置されている。これらの圧力計は、混合気に着火した際の爆風圧とインパルス（力積）の計測に用いた。ダクトの天井部分には、時間応答の早い熱電対を設置し、混合気に着火した際の火炎伝播速度の計測に用いた。また、ダクトの外から可視および赤外カメラで記録を行なった。

水素放出実験の場合には、ダクト中央に床面から 0.15m の位置にノズルを設置し、音速で上向きに水素を放出した。ダクト内に一定速度の換気風を作り出すために、ダクトの端部にファンを設置した。風速の計測には、抵抗に供給する電力と風による冷却の熱バランスで風速を求める熱線式風速計を用いた。天井には、水素濃度計測用のサンプリングチューブを換気風の下流側に 10 箇所設置した。このガスサンプリングシステムは、3 つの真空引きされた容積 1 リットルのボトルとバルブから構成されており、指定した時刻にバルブが開き、サンプリングチューブ近傍のガスを収集するものである。実験後にボトルを回収し、水素濃度計で収集したガスの分析を行なった。

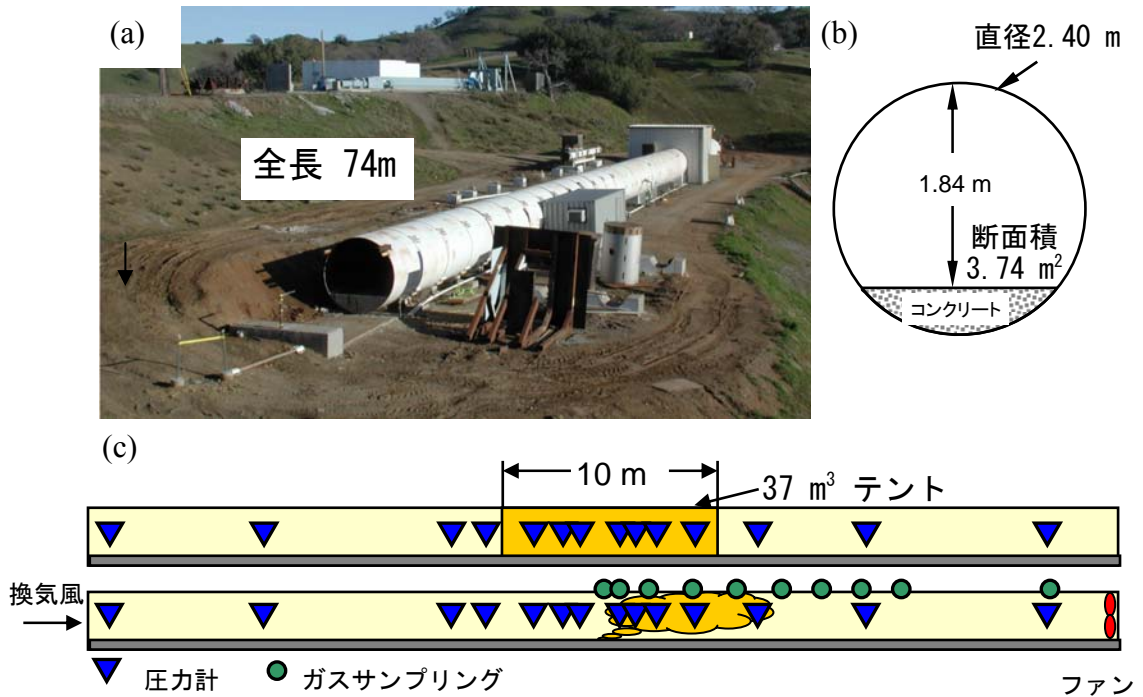


図 2.3(4)①a-1 鋼鉄製ダクト((a) 外観、(b) 断面図、(c) 計測器配置図)

イ. 水素均一濃度実験

これまでに実施したダクト内水素 30%、20%、9.5%均一濃度、混合気体積 37 m^3 の爆燃を補足するため、15%水素濃度についても 37 m^3 混合気をダクトに設置したテント内に保持して、電気スパークで点火、爆燃させた。ダクト内で観測された最大の爆風圧と火炎伝播速度を混合気の濃度で整理したものを表 2.3(4)①a-1 に示す。

また、ダクト内の最大爆風圧、インパルスの分布を図 2.3(4)①a-2 及び図 2.3(4)①a-3 に示す。30%、20%の水素濃度と同様に 15%水素の場合も、ダクト内での爆燃では開放空間より大きな圧力が発生した。9.5%水素の実験では、着火は確認されたが、爆風圧は圧力計の検出限界以下であった。図 2.3(4)①a-2 からわかるように、各濃度とも、ダクト内で混合気の外を圧力が伝播する過程で圧力の減衰はみられなかった。水素濃度が 30%の場合は 9.5%の場合の爆風圧より約 1 桁大きい値となり、水素濃度が発生する爆風圧に大きく影響していることがわかる。また、表 2.3(4)①a-1 に示すように混合気中での火炎伝播速度がダクト内では開放空間より高かった。

表 2.3(4)①a-1 ダクト内での水素漏洩の結果 (水素均一濃度)

	水素濃度(%)	9.5	15	20	30	(参考) 天然ガス 9.5%
トンネル内	ピーク過圧 (kPa)	0.3 以下	22	35	150	17
	火炎伝播速度 (m/s)		98		163	89
(参考) 開放空間	ピーク過圧 (kPa)	—	0.5	2.1	9	0.5 以下
	火炎伝播速度 (m/s)	—	5	29	42	7.5

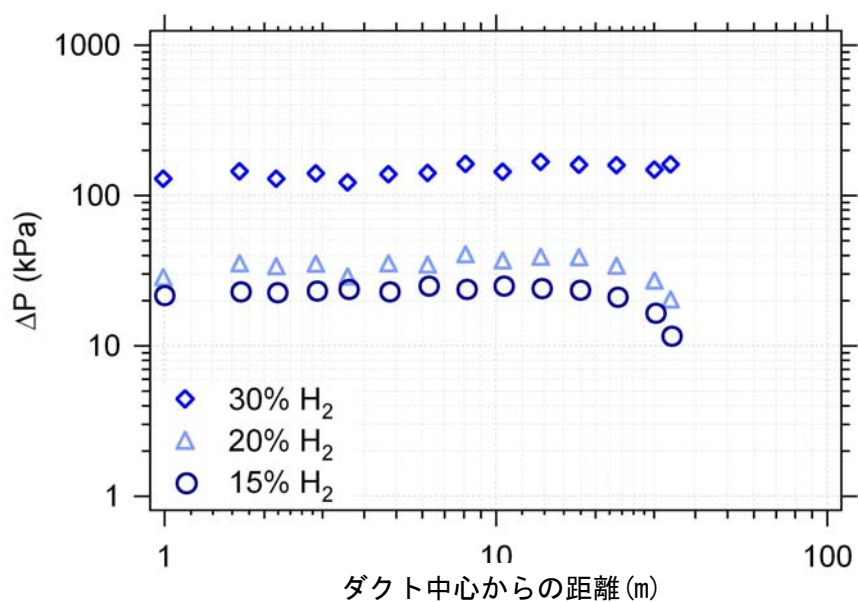


図 2.3(4)①a-2 ダクト内の最大爆風圧の分布 (水素濃度 30, 20, 15%)

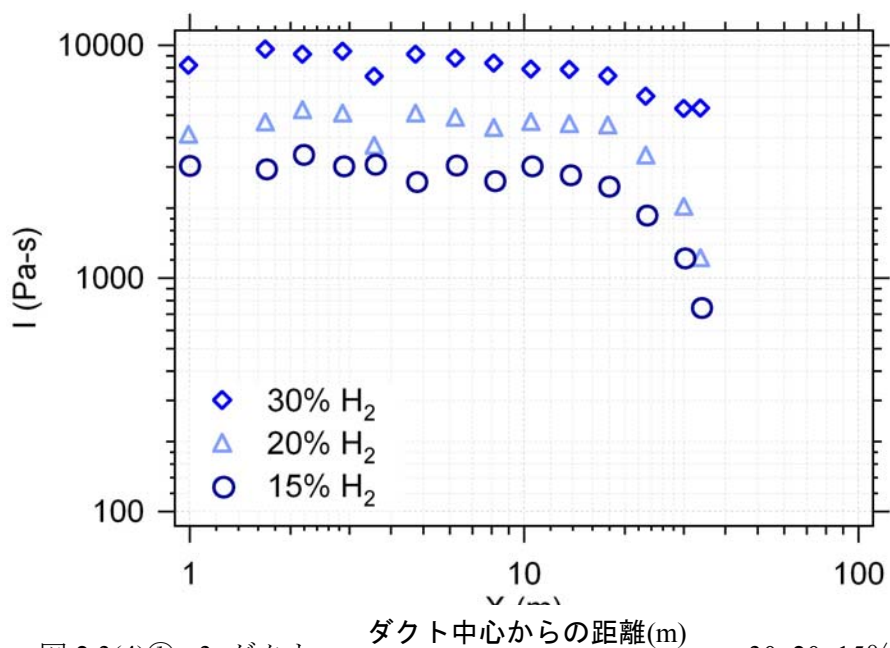


図 2.3(4)①a-3 ダクト内の最大爆風圧の分布 (水素濃度 30, 20, 15%)

ウ. 水素放出実験

この実験では、燃料電池自動車、燃料電池バス、輸送用容器 1 本、輸送容器 2 0 本からの漏えいを想定し、ダクトを 1/5 スケールのトンネルとして、濃度分布が実際の分布と相似となるよう、水素放出速度と換気速度を設定した。安全側に評価をするため、実際に想定される条件より、水素放出速度を大きめ、トンネル内風速を小さめに設定している。水素は音速で天井に向けて放出した。実験条件と結果を表 2.3(4)①a-2 に示す。いずれのケースでもトンネル内水素濃度は 10% 以下であり、

スパークで着火しないか、着火した場合でも最大過圧が $\sim 0.07\text{kPa}$ と十分に小さかった。トンネル内で水素が放出されても、空気と急速に混合希釈されるならば大きな被害は発生しないことが予想される。

この実験では、着火を抑制する、もしくは着火後の発生する爆風圧等を低減するために換気速度が水素濃度に与える影響を詳細に調べた。換気速度を変化させた場合のダクト内の水素濃度の分布を図 2.3(4)①a-4～図 2.3(4)①a-6 に示す。

図 2.3(4)①a-4 は、実験開始から 200 秒後の水素濃度分布であるが、換気速度の違いによる濃度の大きな差はない。一方、図 2.3(4)①a-5 に示すように、換気風速がない場合は下流側で水素濃度が 6 %程度に増えているが、換気速度が 0.43m/s の場合には、水素を放出している中心近傍以外は、着火下限濃度の 4 %以下の値となっている。さらに図 2.3(4)①a-6 では、換気風速の効果はさらに顕著になり、換気風速のある場合は、中心部を除くダクト全域にわたって着火下限濃度以下となることがわかった。また、これら 3 種の実験では、換気速度が 0 m/s のみ着火することが確認されており、十分な時間がたった後は、換気風が着火抑制に効果があることが示された。但し、図 2.3(4)①a-4 で得られた結果から、放出直後に水素濃度を低下させるには、さらに大きな換気風速が必要であると考えられる。

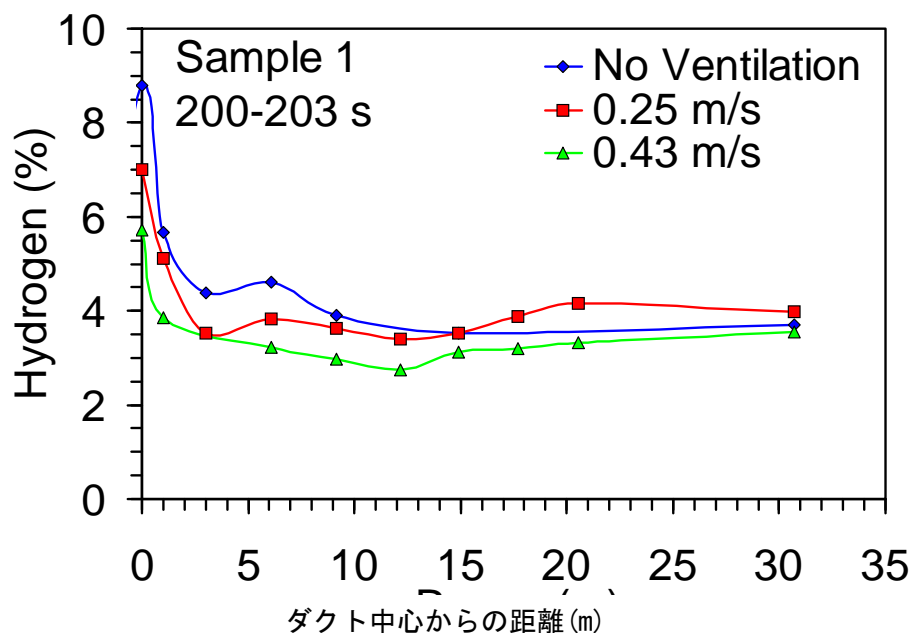


図 2.3(4)①a-4 換気速度を変化させた場合の水素の濃度分布
(実験開始から 200 秒後、換気速度 $0, 0.25, 0.43\text{m/s}$)

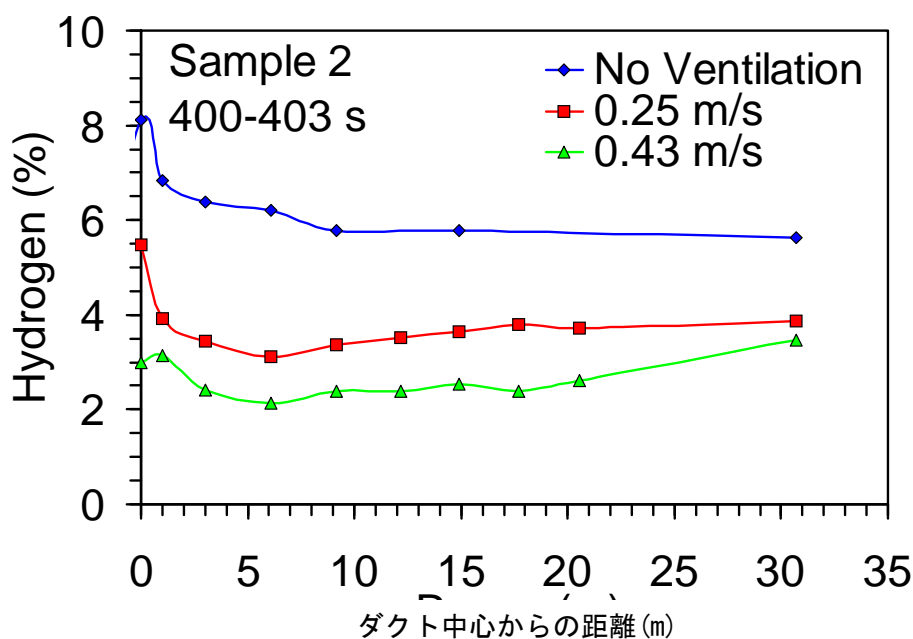


図 2.3(4)①a-5 換気速度を変化させた場合の水素の濃度分布
(実験開始から 400 秒後、換気速度 0, 0.25, 0.43m/s)

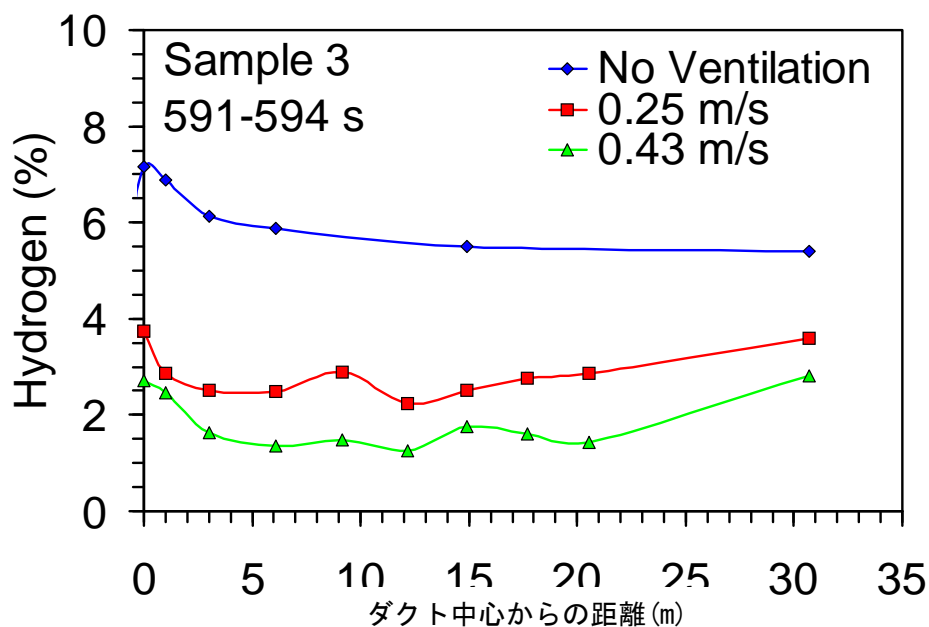


図 2.3(4)①a-6 換気速度を変化させた場合の水素の濃度分布
(実験開始から 591 秒後、換気速度 0, 0.25, 0.43m/s)

表 2.3(4)①a-2 ダクト内水素放出実験 条件と最大ピーク過圧

車両 模型	H ₂ 放出速度* ¹⁾ (m ³ NTP/sec)	点火 時期* ²⁾ (sec)	換気速度 (m/sec)	実機の 漏えい 想定* ³⁾	最大ピーク過圧 (kPa)	最大水素 濃度 (vol%) (計測時刻)
なし	(初) 0.085 (6.8 sec) 0.026	6.8	0	①	非着火	6.3 (3-5 sec)
なし	(初) 0.085 (34 sec) 0.026	34	0	②	非着火	9.5 (20-30 sec)
なし	(初) 0.049 (594sec) 0.015	594	0	④	0.07	8.8 (200-203 sec)
なし	(初) 0.085 (34 sec) 0.026	34	0.21	②	0.016	8.4 (10-13 sec)
なし	(初) 0.049 (594sec) 0.015	594	0.25	④	非着火	7.0 (200-203 sec)
なし	(初) 0.195 (6.9sec) 0.058	6.9	0.22	③	非着火	9.6 (1-3 sec)
なし	(初) 0.049 (594sec) 0.015	594	0.43	④	非着火	5.7 (200-203 sec)
バス 模型	(初) 0.049 (594sec) 0.015	594	0	④	着火 ΔP 検出限界以下* ⁴⁾	9.5 (200-203 sec)
なし	(一定) 0.028	594	0.26	④	着火 ΔP 検出限界以下* ⁴⁾	6.7 (400-403 sec)

*1) 水素放出速度：放出に伴うタンク内圧低下を反映させて漸減

*2) タンク内貯蔵水素量の70%放出時に着火することを想定

*3) 実機の漏えい想定

① FCV, 35MPa/60m³NTP, 開口 5mmΦ, 水素漏えい量 42m³NTP/15.2sec

② FCBus, 35MPa/300m³NTP, 開口 5mmΦ, 水素漏えい量 210m³NTP/75.9sec

③ 20MPa/140m³NTP, 1本カートリッジ, 開口 10mmΦ, 水素漏えい量 98m³NTP/15.5sec

④ 20MPa/3,000m³NTP, 20本カートリッジ, 開口 5mmΦ, 水素漏えい量 2100m³NTP/1329sec

*4) 圧力センサー検出限界：～0.02kPa

b. 建屋内での水素の拡散・燃焼挙動の研究

7. 実験設備

この実験では、幅 3.7m、高さ 2.8m、奥行き 6.4m の閉鎖された空間内で水素を放出し、着火を試みた。図 2.3(4)①b-1 及び図 2.3(4)①b-2 に実験設備外観および内部を示す。設備は鋼鉄の I ビームで骨組みを作り、その内部に鋼板を溶接して作成されている。鋼板の継ぎ目からガスが漏れることがないように鋼板の継ぎ目には樹脂を埋め込んで、気密を保つようにした。

天井部分に 1 放電あたりのエネルギーが 15mJ の電気スパークを設置し、混合気への着火を試みた。実験設備の内部 4 箇所には圧力計を設置し、着火した際の爆風圧を計測した。また、実験設備の外部には、開口部側の地面と同じ高さに圧力計を設置している。天井には、火炎伝播速度を計測するための熱電対を設置した。実験時には設備の前面はポリエチレンのシートで覆い、実験設備の外部から可視・赤外カ

メラを用いて内部を計測できるようにした。赤外カメラで火炎を計測した場合には、このデータから垂直方向の火炎伝播速度を見積もった。前節のダクト実験で使用したガスサンプリングシステムを用い、実験中の天井付近の水素濃度を測定した。

車庫を模擬した実験では、水素は自動車の給油口近傍から漏えいすると想定した。水素は音速で上向きに放出され、水素の流量は、音速ノズルと上流側の圧力で制御している。

強制換気の効果調べる実験では、水素は床面中央から音速で上向きに放出した。換気は、防爆のファンを使って行い、換気ダクト内の風速の径方向分布を測定し、分布が対称であると仮定して、換気風速を算出した。



図 2.3(4)①b-1 実験設備外観

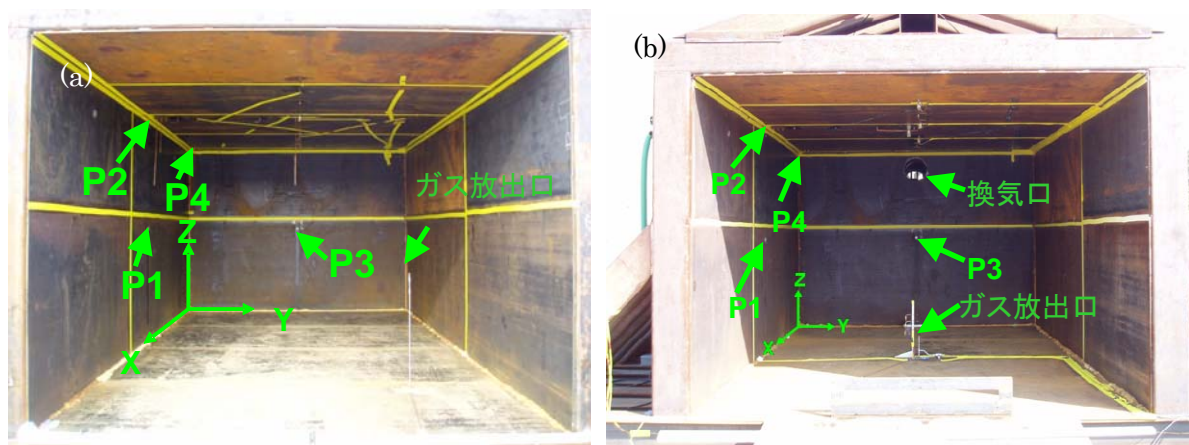


図 2.3(4)①b-2 実験設備内部

- (a) (左側) 自然換気実験：P1～P4 は圧力計、ガス放出口は、車庫を模擬した実験の場合の水素ガス放出口である。
- (b) (右側) 強制換気実験：圧力計の位置は自然換気実験と同じである。水素ガス放出口は、床面中央である。後部壁上部に排気口を設置した。

4. 自然換気の場合

前面のポリエチレンシートの上下にあけられた2箇所の換気口 (0.11m²) からの

自然換気のみ条件で水素を放出し、天井付近の水素濃度を計測するとともに電気スパークで点火を試みた。障害物は、乗用車（フォードエクスペローラー）である。

水素を流速 6.1 リットル/秒で放出したとき最高水素濃度は約 7%で、着火はしたが発生圧力は検出限界以下であった。車庫内に障害物を収納し 38 リットル/秒で水素を放出すると、最高水素濃度は約 24%と障害物の効果はなかったが、この爆燃で場所により最大約 30 kPa のピーク過圧が観測された。表 2.3(4)①b-1 に実験条件と結果を示す。

表 2.3(4)①b-1 建屋内水素放出実験 条件と結果（自然換気）

車両模型	水素流量 (m ³ N/分)	点火時間 (分)	最大過圧 (kPa)	最大水素濃度 (vol%)
なし	0.038	20	7.0	23.0
有り	0.0061	30	<0.02	7.6
有り	0.0061	20	<0.02	N/A
有り	0.038	20	30	24.1

ウ. 強制換気の場合

ダクトによって強制的に給排気される半閉鎖空間において、水素流量、換気量をパラメータとした水素の拡散挙動、および燃焼挙動の把握を目的に実験を行なった。この実験では、障害物は使用していない。0.1、0.2、0.4m³/s の換気量、および 0.002、0.005、0.01、0.015m³/s で水素を放出し、天井付近の水素濃度を計測するとともに天井に設置した電気スパークで点火を試みた。

図 2.3(4)①b-3 に水素流量 0.002 m³/s、換気量 0.2 m³/s の場合の天井付近の水素濃度の時間変化を示す。この実験では、水素濃度の時間変化を詳細に調べるため、2 分毎にガス分析を行なった。水素濃度は、放出開始から数分で約 1.5%に達し、30~40 分まで漸増し、その後の濃度上昇は見られなかった。この結果に基づき、これ以後の実験における水素放出時間は 40 分と設定した。

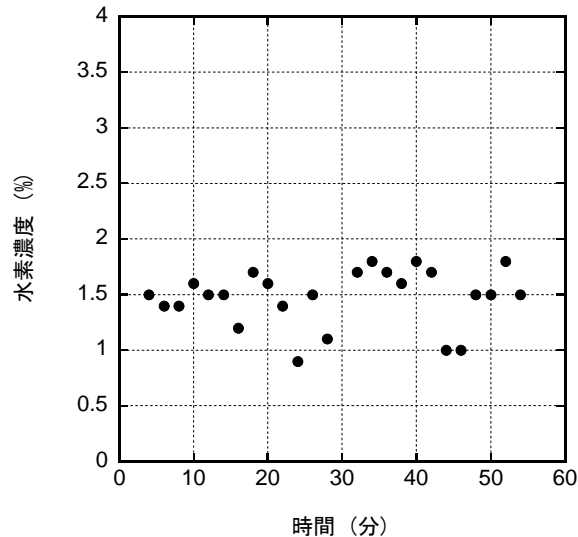


図 2.3(4)①b-3 実験設備天井付近の水素濃度の時間変化
(水素流量 $0.002 \text{ m}^3/\text{s}$ 、換気量 $0.2 \text{ m}^3/\text{s}$)

最大の水素濃度および爆風圧のまとめを表 2.3(4)①b-2 及び表 2.3(4)①b-3 に示す。表 2.3(4)①b-2 より換気量が等しい場合には、水素濃度は、水素流量とともに増加し、水素流量が等しい場合には、換気量の増加とともに減少する傾向であることがわかる。表 2.3(4)①b-3 に示すように、過圧が測定されたのは、水素流量が $0.015 \text{ m}^3/\text{s}$ の場合のみであり、その他は水素流量が小さくなるか、換気量が大きくなるとともに、着火した場合でも発生過圧が測定下限以下か、着火しなくなることがわかった。

ここで、水素放出量(q)と換気量(Q)の比を無次元化漏えい量(q/Q)と定義する。最大の水素濃度を無次元化漏えい量で整理したものを図 2.3(4)①b-4 に示す。ばらつきはあるものの、様々な換気量と水素漏えい量の組み合わせにおいて、無次元化漏えい量と実験設備天井付近の最大水素濃度がほぼ比例していることがわかった。したがって想定される漏えい量が与えられれば、必要な換気風量を見積もることができる見通しを得た。但し、これは十分に時間が経過した後の濃度であるので、漏えい直後などの過渡的な状態の濃度分布を知るには、CFD (数値流体力学) などのシミュレーション技術を利用した評価が必要である。

図 2.3(4)①b-5 に無次元化漏えい量で整理した最大の爆風圧の関係を示す。ここで混合気に着火しなかったものについては 0 kPa とし、計測に用いた圧力計の測定下限が 0.02 kPa であるため、熱電対で着火が確認されたが、有意な爆風圧が計測できないものを 0.02 kPa としてプロットした。図 2.3(4)①b-5 に示すように、今回の実験条件では、無次元化漏えい量が 0.03 近傍で着火・非着火が分かれることがわかった。

以上の結果から、閉鎖空間において水素漏えいが発生したとしても、無次元化漏えい量から見積もられる換気量を確保することで、濃度を低く抑えることができ、着火した場合においても、発生する過圧を小さくできるといえる。

表 2.3(4)①b-2 最大濃度データまとめ

水素濃度(%) (最大値)		水素流量			
		0.002 m ³ /s	0.005 m ³ /s	0.01 m ³ /s	0.015 m ³ /s
換気量	0.1 m ³ /s		5.2	8.6	13.1
	0.2 m ³ /s	1.8	3.6	7.2	8.6
	0.4 m ³ /s		4.0	7.2	7.3

表 2.3(4)①b-3 最大過圧データまとめ (着火源：天井)

爆風圧(kPa) (最大値)		水素流量			
		0.002 m ³ /s	0.005 m ³ /s	0.01 m ³ /s	0.015 m ³ /s
換気量	0.1 m ³ /s		測定下限*以下	測定下限*以下	0.053
	0.2 m ³ /s	着火せず	着火せず	測定下限*以下	0.041
	0.4 m ³ /s		着火せず	測定下限*以下	測定下限*以下

*測定下限：0.02kPa

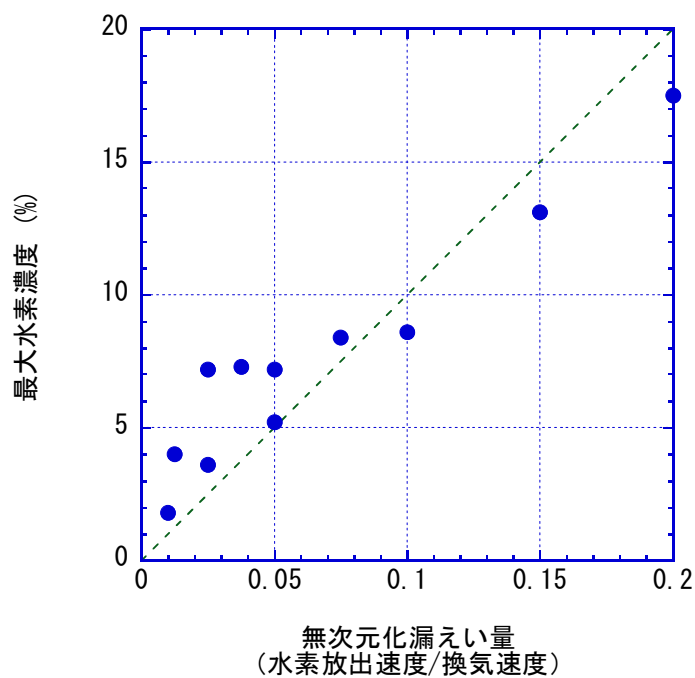


図 2.3(4)①b-4 無次元化漏えい量と天井付近の最大水素濃度の関係

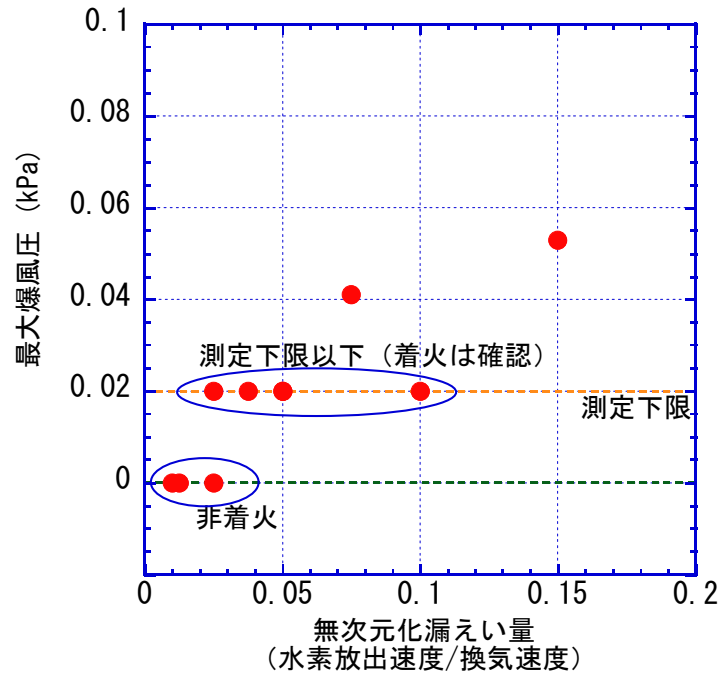


図 2.3(4)①b-5 無次元化漏えい量と爆風圧の関係

c. 着火メカニズムの解明

本研究所は、米国 S R I インターナショナルの実験場で一定量の水素ガスを大気中に放出した後、電気スパークによって着火し、燃焼挙動や火炎によって発生する爆風圧や熱流束の計測を計画していた。しかし、図 2.3(4)①c-1 に示すように、放出開始後約 0.36 秒後に高さ 5m 付近で自己着火するという結果となった。着火源については、原因を断定することはできなかった。そこで、主に文献や専門家への聞き取り調査にて着火源の検討を行い、着火条件について考察を行なった。

混合気に着火するには、着火源が必要であるが、火炎を除く一般的な着火源としては、以下が考えられる。

- (a) 触媒燃焼もしくは、ガス放出の際にパイプ内面から剥離したダスト同士、ガス分子同士の衝突による発熱
- (b) 断熱膨張によって生成された水滴・氷滴の帯電による静電気放電
- (c) 空気中のダストの帯電による静電気放電

ここで、(a)については、大気中に反応を促進する触媒が存在しないこと、実験を行う前に、配管中のダストを取り除くフリーブローを行なっていること、ガス分子の質量が小さいことから、ガス分子同士およびガスと実験装置との接触・摩擦によっても発熱体が生成された可能性は極めて小さいと推測される。(b)については、水素は実験を行った温度では、ジュールトムソン係数は負であり、断熱膨張の際には、わずかではあるが発熱するため、水滴が生成されたとは考えにくい。これらのことから、(a)および(b)の因子は、着火源になった確率が極めて小さい。しかし、実験場は砂漠地帯にあり、ガスが放

出された空間には、塵埃のような浮遊微粒子、パイプおよびノズルから剥離されたダスト、あるいは雨天では水蒸気・雨滴(以下、これらを総称してダストという)が存在していた可能性は否定できない。

このような背景から、ガスの放出空間にダストが存在していたと仮定すれば、放出されたガスのエネルギーが大きいために、ダストの衝突、摩擦、分裂・破壊等が引き起こされて帯電し、それらの集合体が帯電雲を形成、これからの放電が着火源になった可能性が考えられる。

以上のことから、着火が帯電雲と設置された金属との間で放電がおき、着火源になったと仮定して解析を進めた。着火に必要な電場から、空間電荷密度、ダストの濃度を見積もったところ、直径 20cm の帯電雲によって水素が着火する可能性があることが示唆された。これらのことから、ダストによる静電気雲と接地金属物体との間の放電が着火原因である可能性が高いと推測される。これは、SRI の実験において、着火位置が、ガスサンプリングチューブ(銅製、接地されている)の位置とほぼ同じ高さであることと一致している。

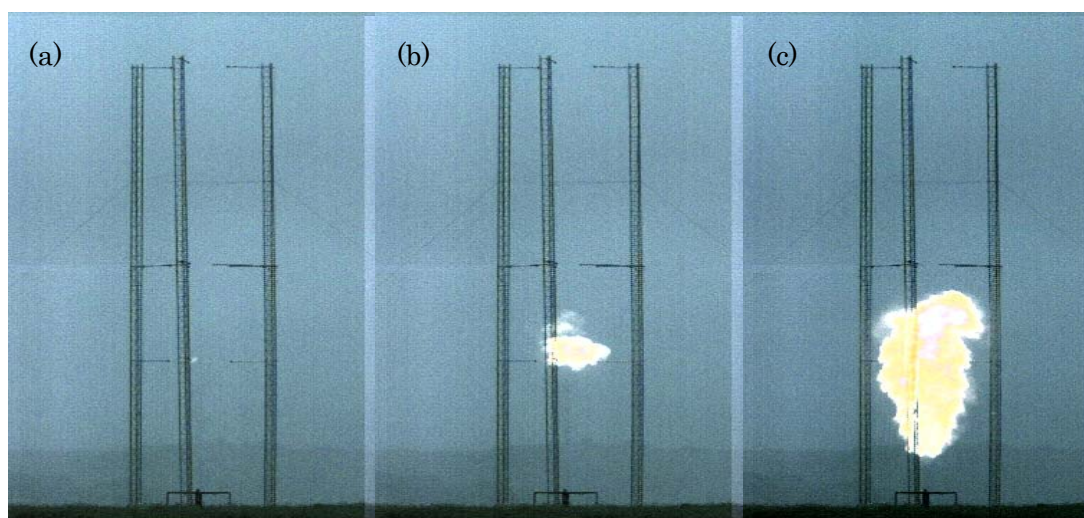


図 2.3(4)①c-1 大量水素放出実験の自然着火 (a) 水素ガス放出開始後 361ms, (b)380ms, (c)414ms

d. 水素有効利用ガイドブックの作成

既に述べたように現在、産学官を挙げて水素関連技術の研究開発が行なわれている。これまで、水素は特定の分野(石油精製や化学工業など)において用いられており、その取り扱い方法については長年の経験が蓄積されている。一方、定置用燃料電池、水素ステーションや燃料電池自動車に関連する分野において、新たに水素を取り扱う関係者が増加し、今後の水素社会への移行へ向けて、その数はますます増えるものと考えられる。平成 14 年度には「水素の物性と安全ガイドブック」がまとめられているが、平成 17 年度に行われた規制再点検の反映や昨今の技術開発から明らかになった水素の基礎物性ならびに水素関連設備の取り扱いに関する安全技術の情報データを含めた「水素の有効利用ガイドブック」を編集・作成することとした。このガイド

ブックの目的は、水素の安全に関する技術情報をまとめ、提供することで、技術開発や規制再点検、国際標準の提案に関する研究活動を行なっている水素を取り扱い関係者の安全を確保し、水素が有効に利用されることに貢献することである。

学識経験者や業界団体からなるガイドブック収録内容検討委員会を設置し、本ガイドブックの位置付け、全体構成等についての助言を受けた。またワーキンググループを設置し、執筆者選定、ページレイアウトの策定、編集手続き等の具体的作業にかかわる議論を行なった。

本書の主たる利用者を、装置の取扱者・施工者（プラント・水素ステーションの従業員）、大学・企業の研究者（材料開発など）、企業・研究所の技術開発担当者（燃料電池自動車・水素スタンドの設計者）、政府の政策担当者と想定した。

想定される利用場面としては、作業や実験を行なう際の留意事項の確認だけではなく、開発を行なう際の基礎データ参照、水素の取り扱いに関する講習会での教材としての利用も想定し、収録内容を検討、決定した。委員会、ワーキンググループでの議論に基づき、本年度決定された目次の概要を、表 2.3(4)①d-1 に示す。ガイドブックは、本編と付録からなり、本編では、水素の安全に係わる内容を中心に収録し、付録には、主として専門家向けのデータを収録した。

本ガイドブックは平成 20 年 3 月に発行され、産業界をはじめ水素を取り扱う業界を中心に配布され、また、PDF 版を NEDO ホームページ上で公開している。

表 2.3(4)①d-1 水素の有効利用ガイドブック概要

目次		主な収録内容
第1章	はじめに	本書の目的、利用方法
第2章	水素の基本特性	物理化学的性質、データシート
第3章	水素技術関連材料について	金属・非金属材料、水素脆性
第4章	水素の安全な取り扱い	安全について、教育訓練
第5章	取り扱い上の留意点	法令に基づく必要な届出、日常点検
第6章	水素取り扱い設備・装置・操作における技術	製造・輸送・貯蔵・供給・利用に関する技術
第7章	水素に係る技術確立のためのわが国の取り組み	NEDO 事業と個々のプロジェクト概要
第8章	水素に係る規制	国内規制と国際標準・基準への展開
第9章	トラブル・事故から学ぶ	事例から得られる教訓
付録 A	海外における水素安全技術確立のための取り組み	米国、EUの動き
付録 B	水素基礎物性計測に係る要素技術	ガス検知器、材料試験
付録 C	水素基礎物性に係わる実験データ・解析結果	水素の圧縮・液化、着火・爆燃・爆ごう
付録 D	水素に係わる安全解析・評価技術	FCV、定置用燃料電池、水素ステーションの安全に関する評価技術

② 水素基礎物性の取得と予測研究（実施担当：三菱重工業(株)）

a. トンネル換気模擬ガス模型実験

ア. 実験目的と概要

トンネル内事故により水素ガスが漏えいした場合の安全性を確保するためには、拡散を促進させ濃度程度まで下げる必要がある。そこで、漏えい量やトンネル換気条件の違いがトンネル内水素ガス拡散にどのような影響を与えるかを、模擬ガスを用いた模型実験により把握した。

イ. 模型実験

(a) 実験方法概要

換気機能がついたトンネルを模擬した模型内に、漏えい水素を模擬したガス（ヘリウム+メタン）を放出し、定常状態になった時点での濃度を計測し、水素濃度に換算した。これにより、トンネル内の水素濃度分布を把握した。

また、別途、可視化実験（模擬ガスに白煙を混入させ放出）を実施し、内部の流動の状況を定性的に把握した。

なお、相似則については、漏えい模擬ガスの浮力を再現できるように、排気フルード数を一致させた。（排ガスの浮力と、換気流の慣性力の比を模型と実機で一致させた。）

(b) 実験装置

モデルとしたトンネルは、別途実施した前述の野外実験の形状である。このトンネルの形状を図 2.3(4)②a-1 に示す。このトンネルの縮尺模型を縮尺 1/30 で作成し、実験に用いた。なお、模型は可視化実験に対応できるようにアクリルにて製作した（図 2.3(4)②a-2 参照）。模擬ガスは浮力を模擬するためにヘリウムをベースにし、その中に濃度を計測するためのトレーサガスとしてメタンを少量混入した。模擬ガスは、トンネル模型床面の中央に設けられたエリアより、面源として放出させた。なお、面源の大きさや放出時間は仮想的な放出形態に基づいて、以下のように設定した。

(ア) 非定常漏えい（仮想対象車両：FCV、完成車両搭載車、FCBus）

所定体積分を、所定の時間内で一定量放出する。（流量は一定）

面源の大きさは以下のとおり

- ・ FCV : L4.7m×W1.8m（模型 L157mm×W60mm）
- ・ 完成車両搭載車 : L12m×W2.5m（模型 L400mm×W83mm）
- ・ FCBus : L10.5m×W2.5m（模型 L350mm×W83mm）

(イ) 定常漏えい（仮想対象車両：水素ローリー）

所定流量にて、連続的に放出する。面源の大きさは以下のとおり

- ・ 水素ローリー車 : L12m×W2.5m（模型 L400mm×W83mm）

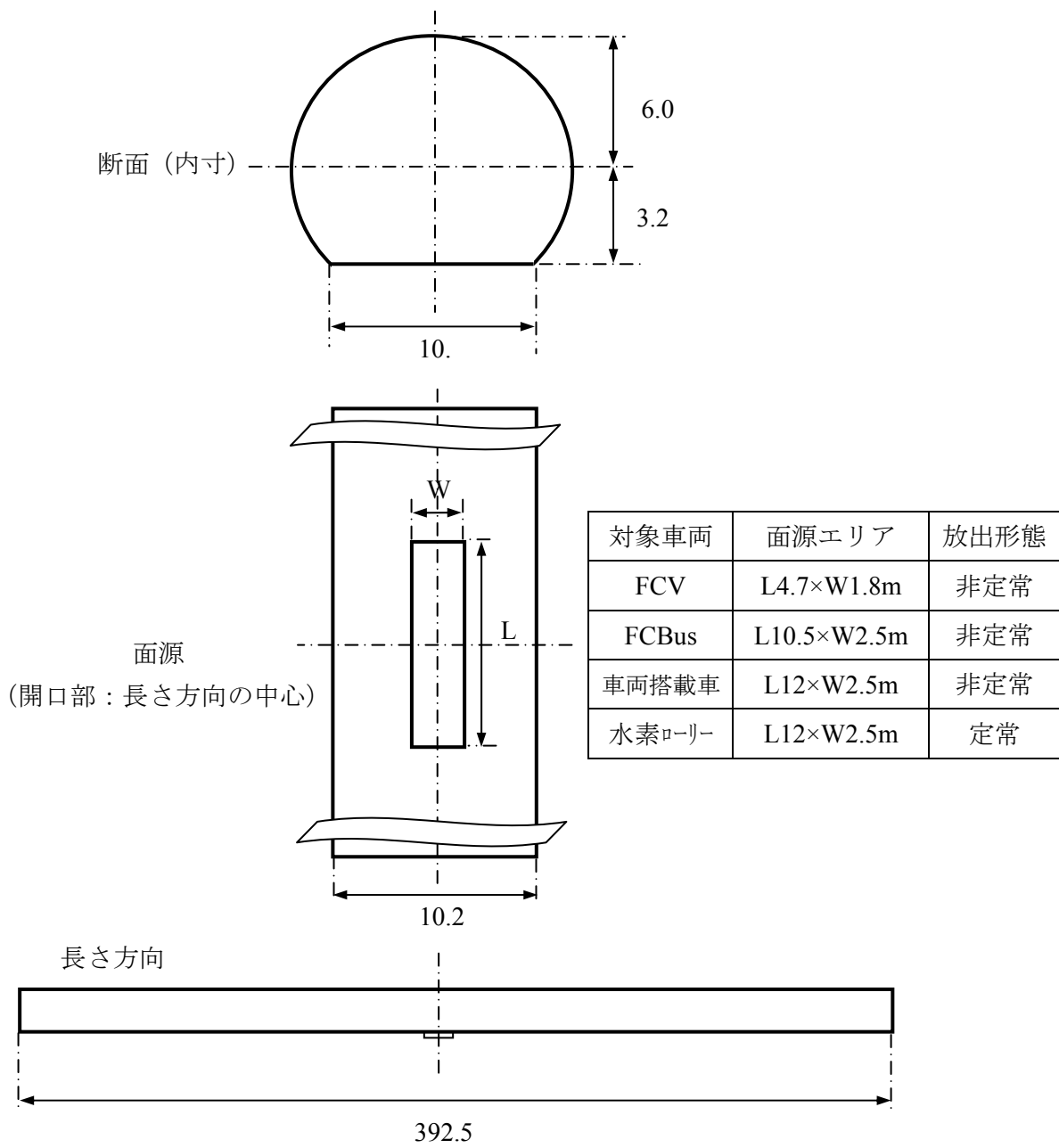


図 2.3(4)②a-1 トンネル形状(実機相当, 単位: m)

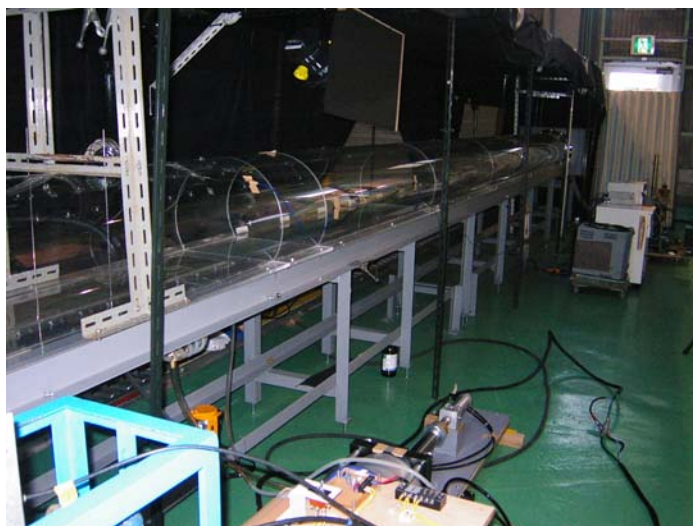


図 2.3(4)②a-2 トンネル模型の外観

トンネル内の換気風速は、トンネル中心位置で所定の換気風速が再現できるように、トンネル端に設置したブローによって調整した。

トレーサーガスの濃度測定は、高応答性の炭化水素濃度分析計 HFR400（非常放出時）及びガスクロマトグラフ装置（定常放出時）を用いて実施した。計測箇所はトンネルの長さ方向に 10 箇所程度、高さ方向に 5 点程度設けた。

(c) 実験条件

想定した仮想漏えい対象ごとの実験条件を表 2.3(4)②a-1 に示す。

表 2.3(4)②a-1 トンネル換気模型実験条件

仮想漏えい源	漏えい量	放出時間	換気風速	漏洩面積 (長さ×幅)	漏えい 形態	備考
	Vp(m ³)	Tp(sec)	Up(m/s)	(m)		
FCV	60	60	0.0	4.7×1.8	非常 放出	漏えい量 Vp を放出時間の間、一定流量で放出
	60	60	2.0			
車両搭載車	200	60	0.0	12×2.5		
	200	60	1.0			
	200	60	2.0			
FCBUS	300	76	0.5	10.5×2.5		
ローリー車	3000	—	0.6	12×2.5		

(d) 実験結果

漏えい量 $60\text{m}^3\text{N}$ 相当の場合について、換気風速有無による濃度分布の差異をとりまとめた。結果を濃度コンター図 2.3(4)②a-3 (トンネルの中心位置[Y=0]における鉛直断面濃度コンター図) に示す。なお、ガスの放出が非定常であるため、濃度は、各計測点が経験した最大濃度と、実機相当での各時刻の瞬時濃度について記載している。図中、風向は右向きである。

各計測点が経験した最大濃度値のコンター図を見ると、換気風速無しの場合には、4%以上の濃度領域が、長さ方向は $X=150\text{m}$ 程度まで到達し、面源付近を除くと、床面から約 6m 以上の高さに存在することがわかる。一方、換気風速 2m/s 時は 4%以上の濃度領域は、長さ方向に $X=15\text{m}$ 程度となり、換気風速無し時に比べると $1/10$ 程度短くなる。

また、各時刻の濃度コンター図で比較すると、換気風速無しの場合には漏えい開始から 180sec 経過して濃度が全領域でほぼ 4%以下になるのに対して、換気風速 2m/s 時は 90sec が経過した時点で、濃度が 4%以下になっている。このように、漏えい量が車 1 台相当 ($60\text{m}^3\text{N}$) の場合、換気風速を 2m/s 程度にすることにより、無風時よりも大幅に可燃濃度域を減少できることを確認することができた。

面源中心付近での排煙可視化状況を図 2.3(4)②a-4 に示す。写真は、漏えい開始から約 50sec 後の瞬間の画像であるが、換気風速が 2m/s になると、排煙は大きく倒されている状況が分かる

同様に、漏えい量 $200\text{m}^3\text{N}$ の場合の結果を図 2.3(4)②a-5 及び図 2.3(4)②a-6 に示す。最大濃度値のコンターを見ると、換気無しの場合及び換気風速 1m/s の場合は、4%以上の濃度領域は、長さ方向は $X=190\text{m}$ 程度まで到達している。換気風速 2m/s になると、4%以上の濃度領域は、長さ方向は $X=190\text{m}$ 程度まで到達し、換気風速 0 の場合と大差ないが、4%以上の領域の大きさ(厚さ)は、換気風速 0 に比べて小さくなっている。また、換気風速 1.0m/s と比較した場合、4%以上の濃度領域は大差ないが、6%以上の濃度領域は、換気風速 2.0m/s の方が大幅に小さくなっている。このように、漏えい量が車両搭載車 1 台相当 ($200\text{m}^3\text{N}$) の場合、換気風速を 2m/s 程度にすることにより、無風時よりも可燃濃度域を減少できることを確認することができた。

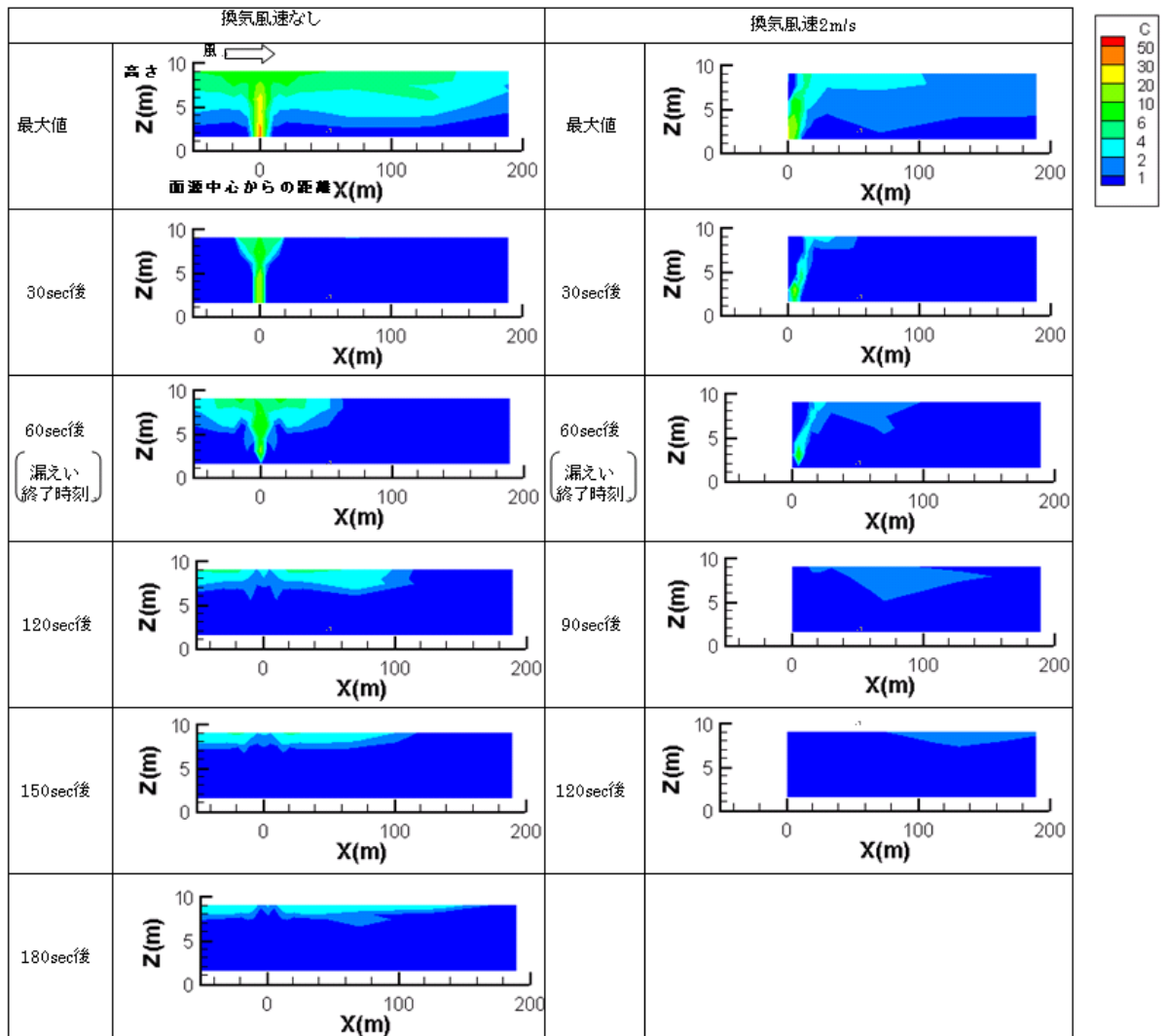


図 2.3(4)②a-3 鉛直断面濃度コンター図 (60m³N 漏えい時)

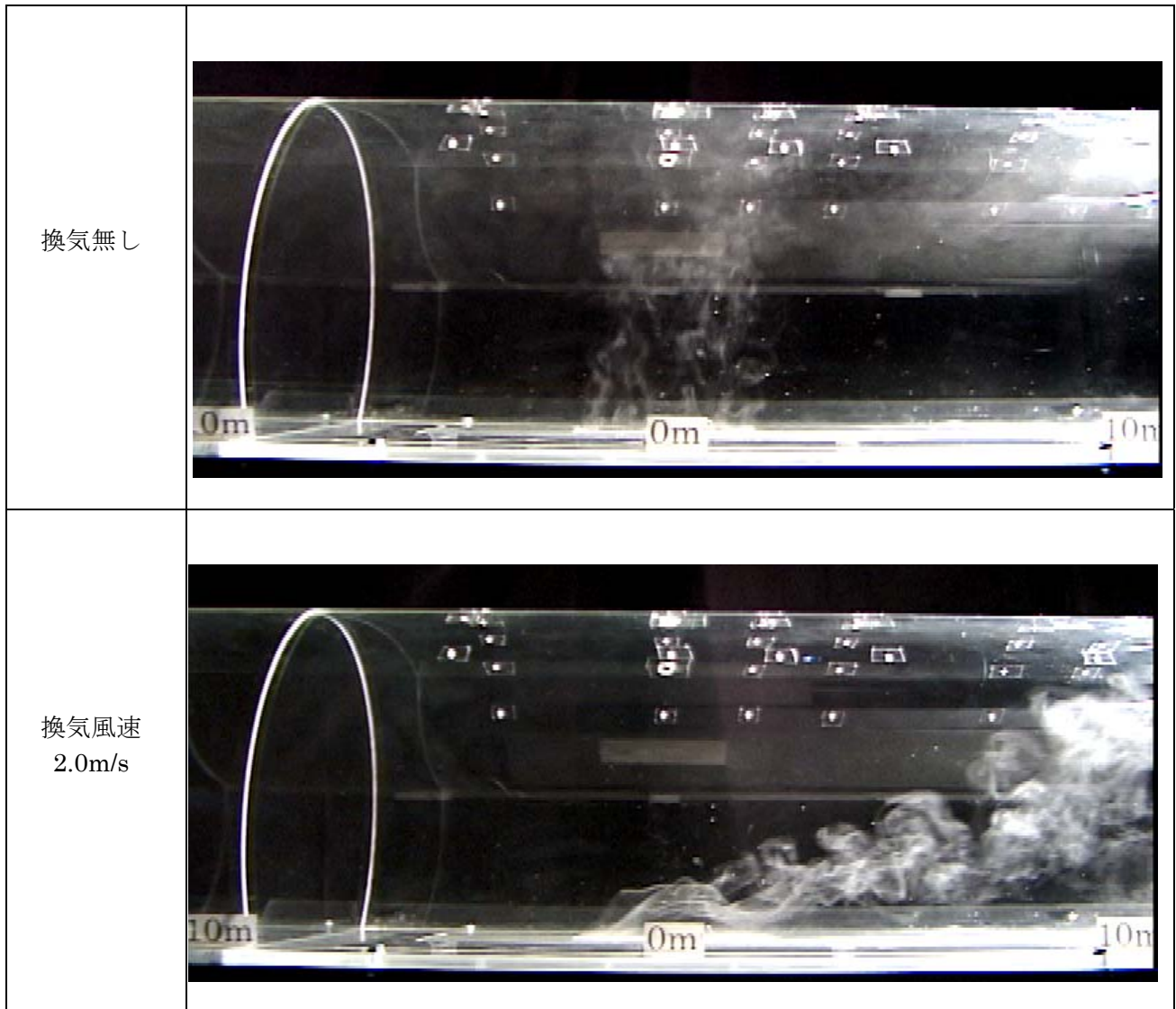


図 2.3(4)②a-4 漏えい源付近の排煙可視化状況
(漏えい量 $60\text{m}^3\text{N}$ 、漏えい開始から約 50sec 後)

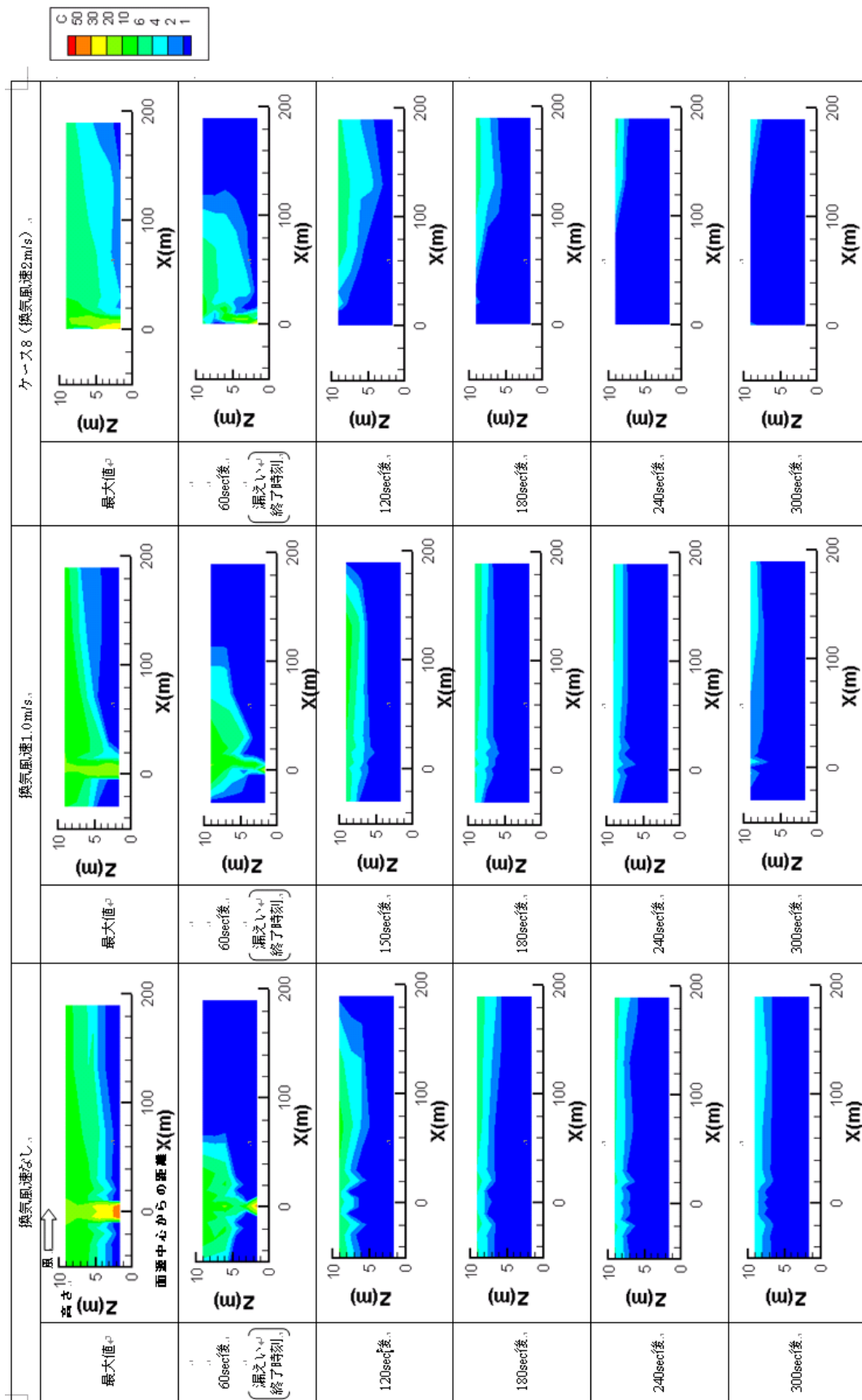


図 2.3(4)②a-5 鉛直断面濃度コンター (200m³N漏えい時)

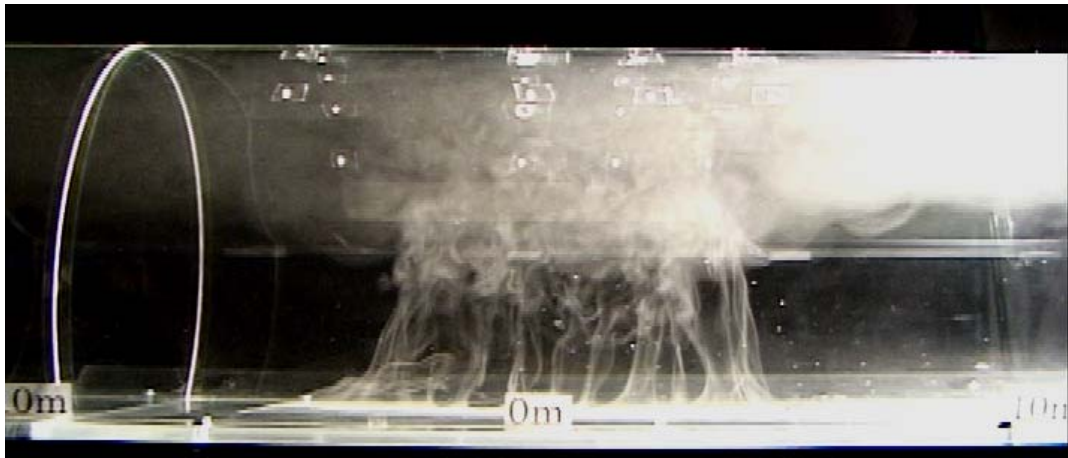
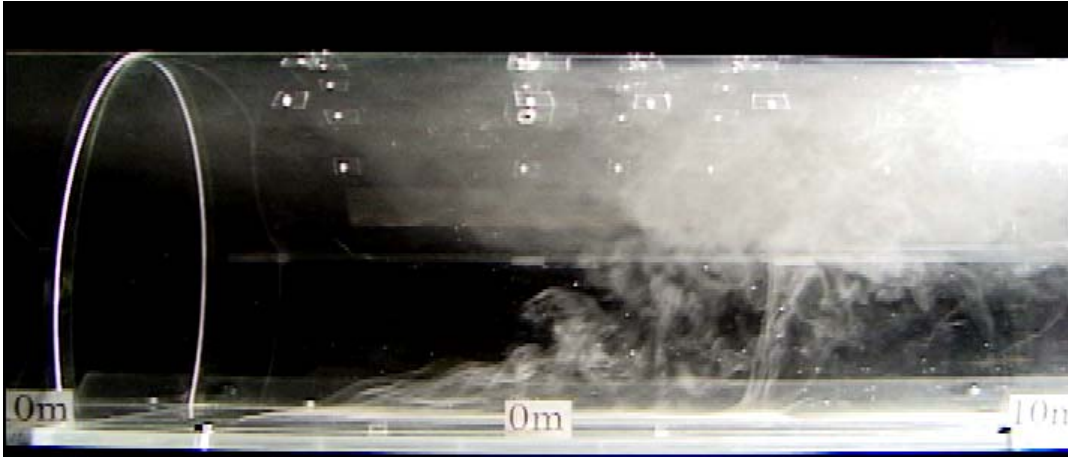
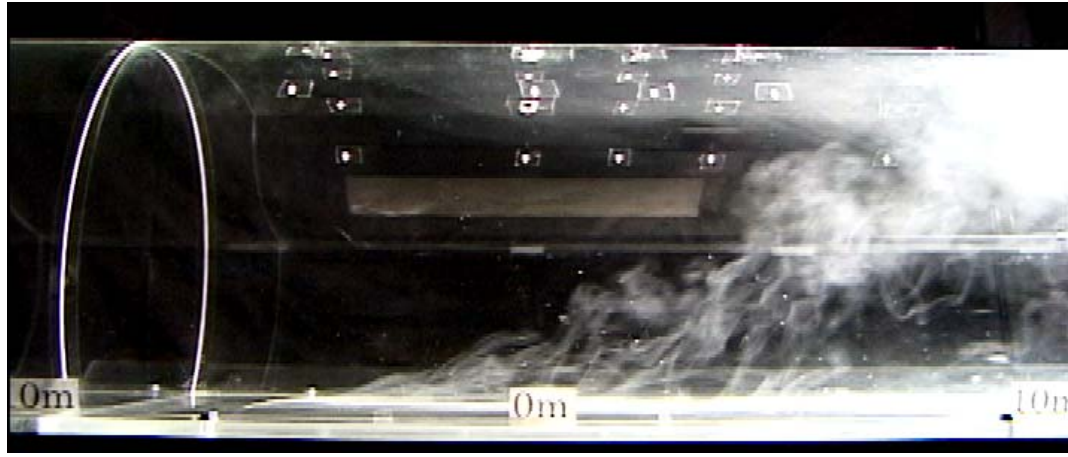
<p>換気2風なし</p>	
<p>換気風速 1.0m/s</p>	
<p>換気風速 2.0m/s</p>	

図 2.3(4)②a-6 漏えい源付近の排煙可視化状況
(漏えい量 $200\text{m}^3\text{N}$ 、漏えい開始から約 50sec 後)

次に大量漏えい時の結果について述べる。

まず、 300m^3N 相当の漏えい（換気風速 0.5m/s ）を想定した実験結果を図 2.3(4)②a-7 に示す。最大濃度値のコンターを見ると、4%以上の濃度領域は、トンネルの長さ方向は $X=-70\sim 190\text{m}$ 以遠まで到達していることがわかる。

各時刻の濃度コンターの変化、漏えい開始から 360sec 経過すると、濃度は 4%未満になる。なお、この実験条件は、別途実施した前述の野外での爆燃実験の条件と同条件である。野外実験と模型実験で天井付近での濃度分布を比較した結果を図②a-8 に示す。模擬ガス模型実験の結果は野外実験の結果より若干大きめの濃度になっているものの^{(*)1}、両者の傾向は概ね一致していることがわかる。

さらに、 3000m^3N 相当の漏えいを想定^{(*)2} した実験結果を図 2.3(4)②a-9 に示す。換気風速が比較的小さい (0.6m/s) ため、面源付近から放出された密度の軽いガスは、トンネルの天井に達した後、浮力の効果によって風下だけでなく風上にも移流する。4%以上の濃度領域はほぼトンネル端まで達している。

(*1) 野外実験ではガスが高圧 (20MPa) で放出されるため、ガスは高速で天井面にぶつかり、その後トンネルの長さ方向や横方向に拡散していくのに対し、模擬ガス実験では、ガスは面源から低速で放出されるため、天井面に到達した後の拡散効果が、SRI の実験に比べて若干小さかったためと考えられる。

(*2) ただし、大量漏えいのため定常的な漏えいとみなし、実験上はピンホール漏えい (20MPa 、 $\phi 5\text{mm}$ 相当) の漏えい量が定常的に継続すると想定して模擬ガスを放出させた。

(e) 成果

(ア) トンネル内で水素の漏えいが発生した際に、通常の換気風速である 2m/s 程度の風速で、大幅に可燃濃度域を減らすことができることを確認した。

(イ) 取得した実験データは、換気基準検討に用いるだけでなく、トンネル内の爆燃現象予測を CFD (数値流体力学) で行う際の基礎データとしても使用した。

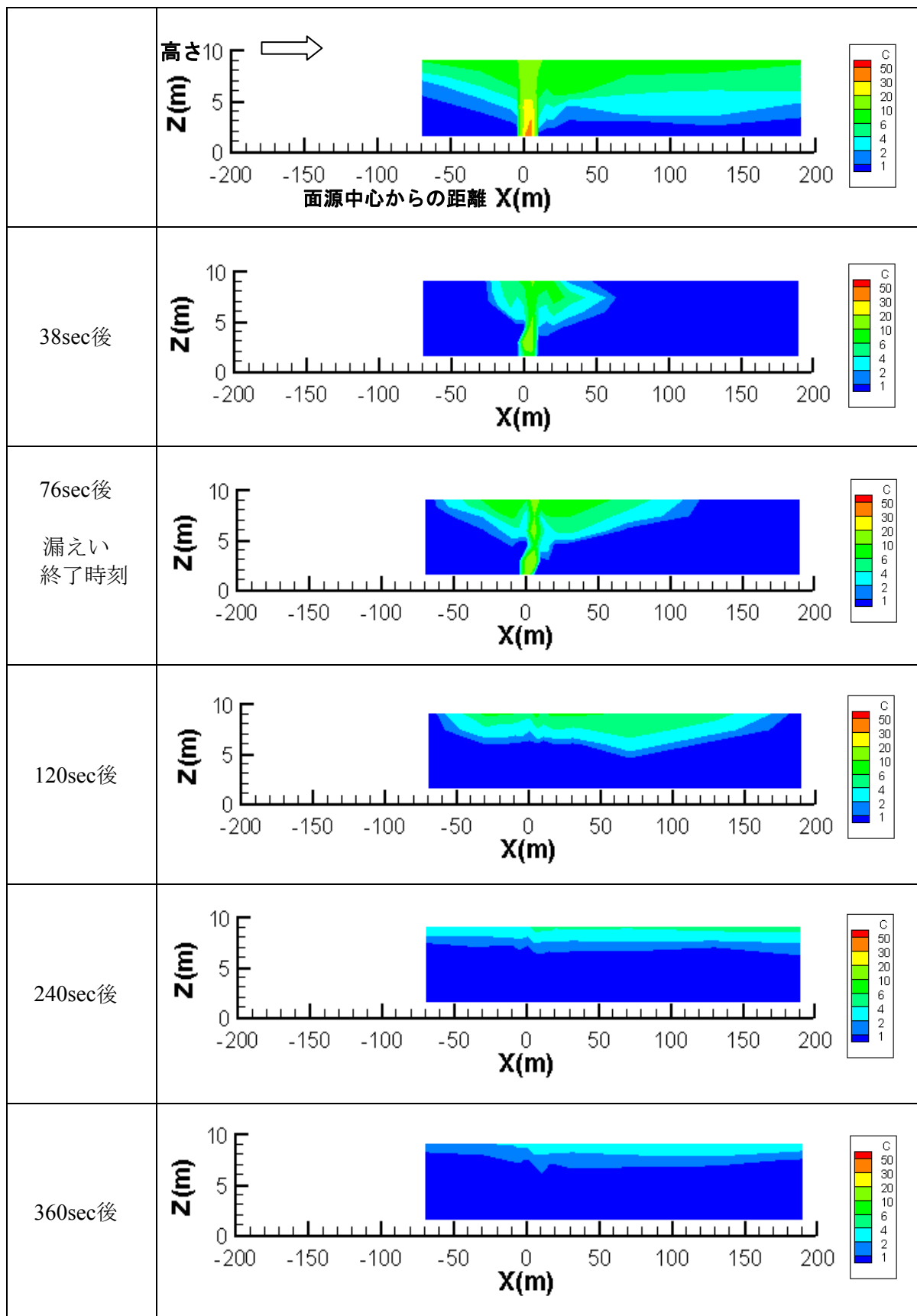


図2.3(4)②a-7 鉛直断面濃度コンター図（漏えい量 $300\text{m}^3\text{N}$ 、換気風速 0.5m/s ）

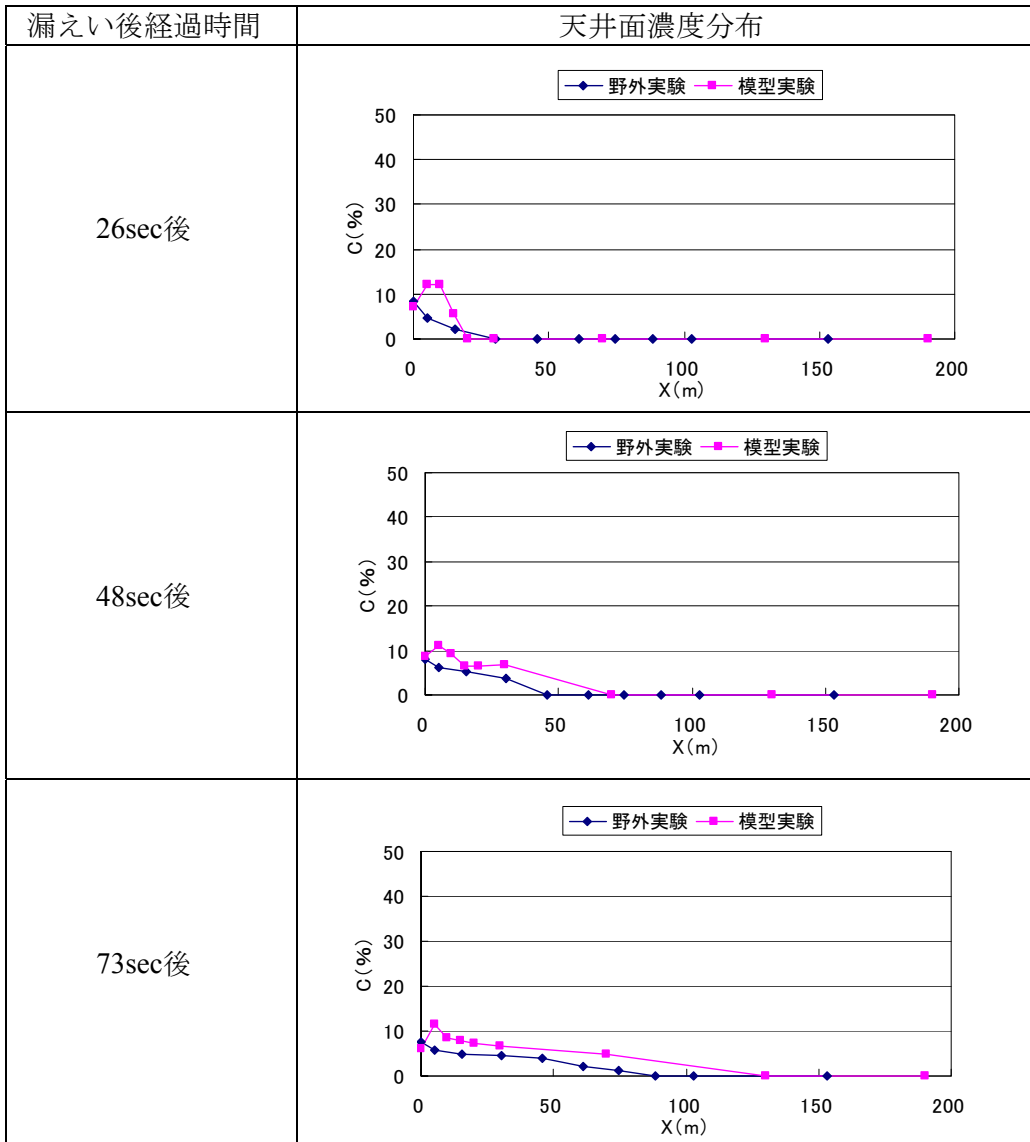


図 2.3(4)②a-8 野外実験と模型実験におけるの天井面濃度比較

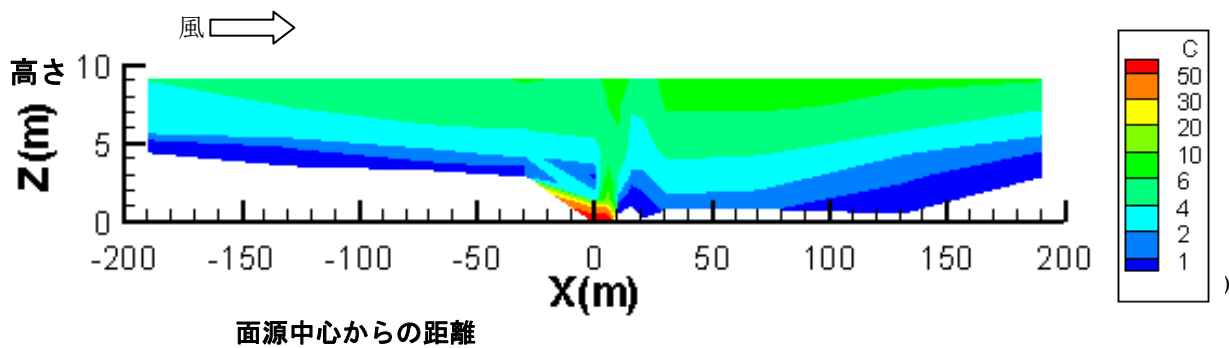


図 2.3(4)②a-9 鉛直断面濃度コンター図 (漏えい量 定常漏えい、換気風速 0.6m/s)

b. 閉鎖／半閉鎖空間における換気の検討

ア. 検討内容概要

閉鎖/半閉鎖空間における換気基準検討のため、模擬ガス模型実験を実施した。これまでの検討は、主に開放空間での拡散挙動を対象としていたもので、平成 17 年度以降は、半閉鎖空間や閉鎖空間で水素ガスが漏えいした場合の拡散挙動・換気状況を把握するための検討を行っている。平成 18 年度は換気装置付きの半閉鎖空間を模擬した縮尺模型（縮尺 1/5）を用いて、水素の浮力をヘリウムで再現した実験を実施し、換気量と濃度場の関係を把握した。

イ. 模擬ガス模型実験

(a) 実験方法概要

換気機能がついた（半）閉鎖空間を模擬した模型内に、漏えい水素を模擬したガス（ヘリウム+メタン）を放出し、定常状態になった時点での濃度（メタン濃度）を計測し、水素濃度に換算した。これにより、空間内の水素濃度分布及び残留水素量を把握した。

また、別途、可視化実験（模擬ガスに白煙を混入させ放出）を実施し、内部の流動の状況を定性的に把握した。

なお、相似則については、漏えい模擬ガスの浮力を再現できるように、排気フルード数を一致させた。（排ガスの浮力と、換気流の慣性力の比を模型と実機で一致させた。）

(b) 実験装置

実験装置の概要は以下のとおりである。

(ア) 閉鎖空間模型：幅 6.4m×奥行き 7.86m×高さ 3.7m のサイズの閉鎖空間

（内部に蓄圧ボンベ 8 本×2 基設置：図 2.3(4)②b-1 参照）を縮尺 1/5 で作成した。（図 2.3(4)②b-2、図 2.3(4)②b-3）。

(イ) 模型装置の排気口側に、流量を制御できるブローを設置し、閉鎖空間内の換気を模擬した。

(ウ) 模型内には、予め、模型の天井部よりトレーサガス吸引用のサンプリング管を挿入（平面上に 16 点、高さ方向に 5 点の計 80 点）し、模型内の換気及びトレーサガスの流れが定常状態になった後、サンプリング管よりガスを吸引し、ガスクロマトグラフを用いて、メタンガスの濃度を計測した。

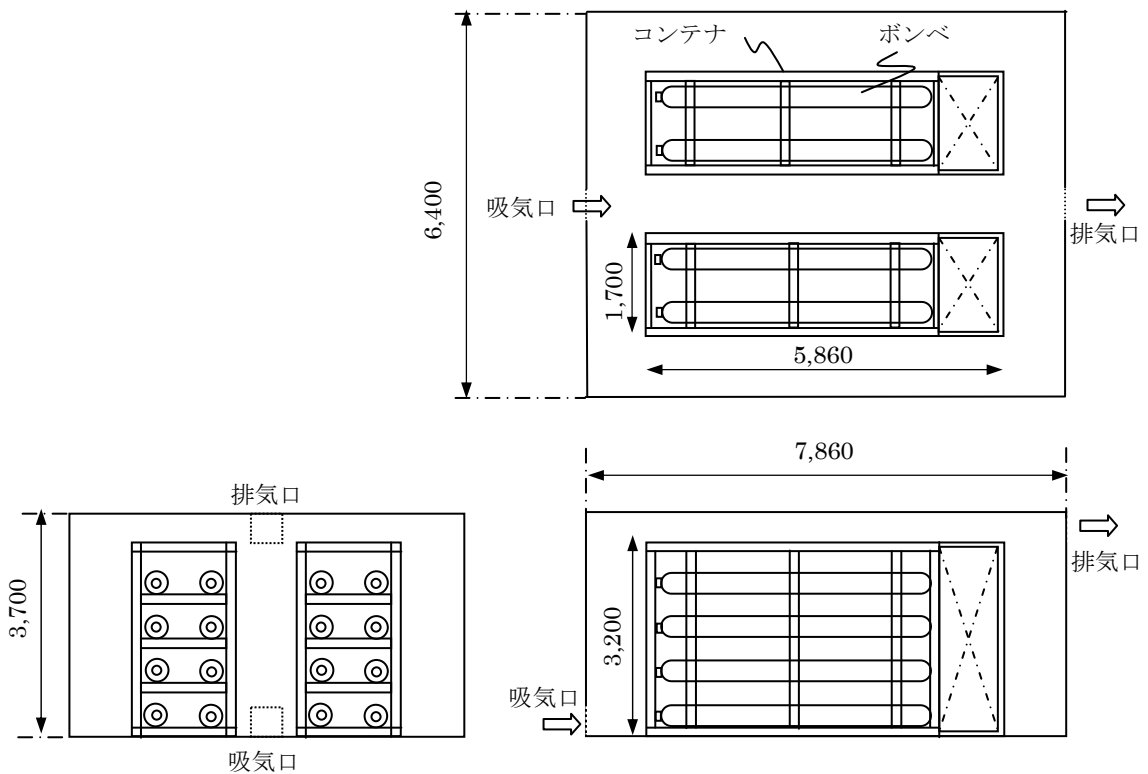


図 2.3(4)②b-1 閉鎖空間モデルの概要図 (実機寸法)

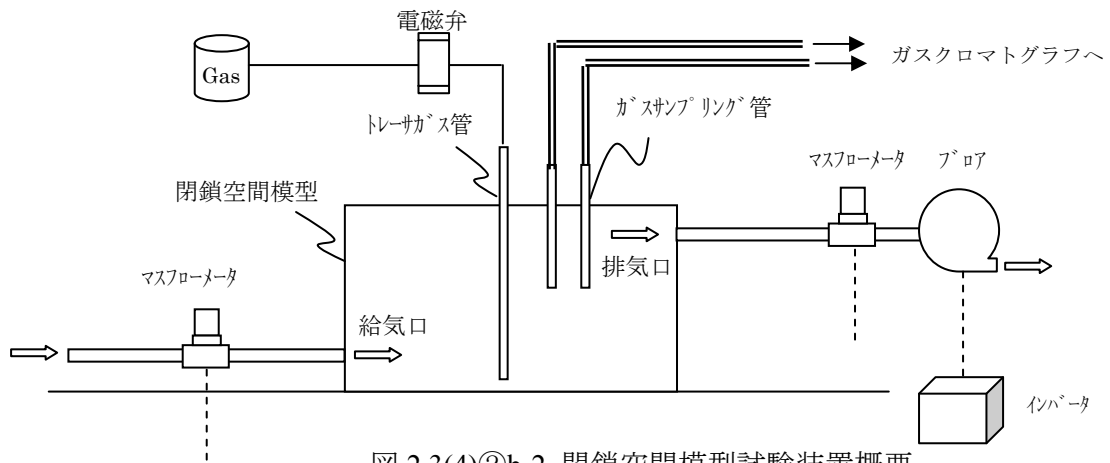


図 2.3(4)②b-2 閉鎖空間模型試験装置概要

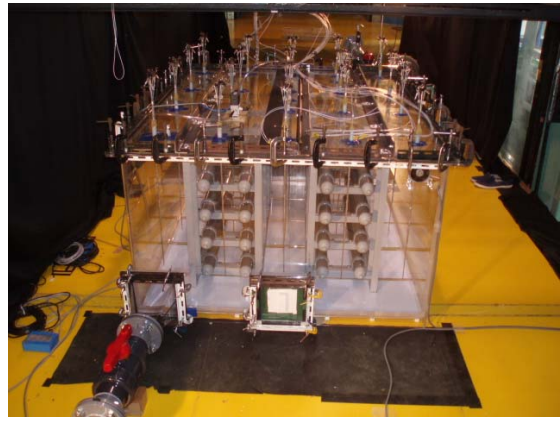
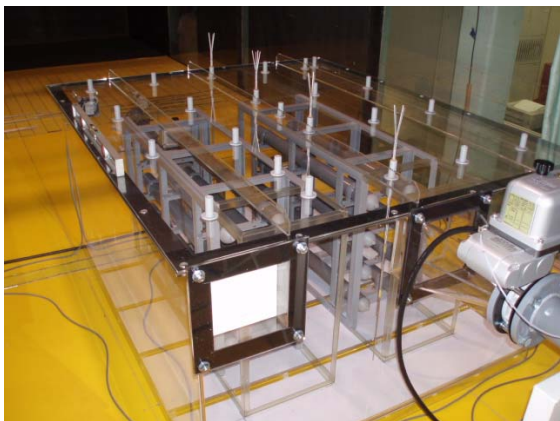


図 2.3(4)②b-3 閉鎖空間模型試験装置外観

(c) 実験条件

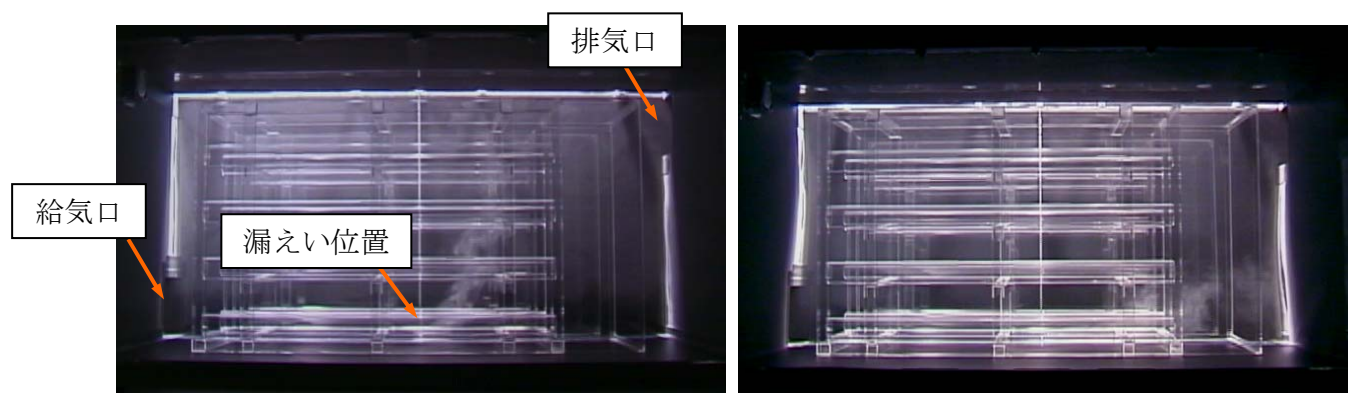
主な実験条件を表 2.3(4)②b-1 に示す。

表 2.3(4)②b-1 実験条件の設定

大項目	項目	条件
蓄圧器室	寸法	幅 6.4m×奥行き 7.86m×高さ 3.7m
	障害物	ポンベ 8 本×2 基 及び 障害物なし
換気方法	換気流量 Q	350m ³ /h、700m ³ /h、1500m ³ /h、3190m ³ /h、5350m ³ /h (既存の CNG 規制では 700m ³ /h)
漏えい形態	漏えい流量 q	0.002m ³ /s、0.0089m ³ /s、0.02m ³ /s (40MPa で 0.1,0.2,0.3mm のピンホールからの漏えい量に相当)
	漏えい向き	下向き (最も換気に不利と考えられる向き)
	漏えい位置	中央部
	漏えい高さ	Z1 (下段) Z2 (上段)

(d) 実験結果

図 2.3(4)②b-4 に模型実験の可視化状況例を示す。この図は換気量の違いによる可視化状況の差異を示している。換気量が小さい場合は、水素の浮力により、中央下部で漏えいした水素ガスが、上方に移流した後に換気されているが、換気量が大きい場合には、換気の効果が強いため、漏えい源から換気口の方にガスが倒されながら移流している様子が覗える。



(a) 換気量 350m³/h

(b) 換気量 1500m³/h

図 2.3(4)②b-4 可視化実験状況 (漏えい量 0.0089m³/s 相当)

図 2.3(4)②b-5 には残留水素の平均濃度（室内に残留している水素量を室内空間で平均化した濃度）と換気量の関係を示す。

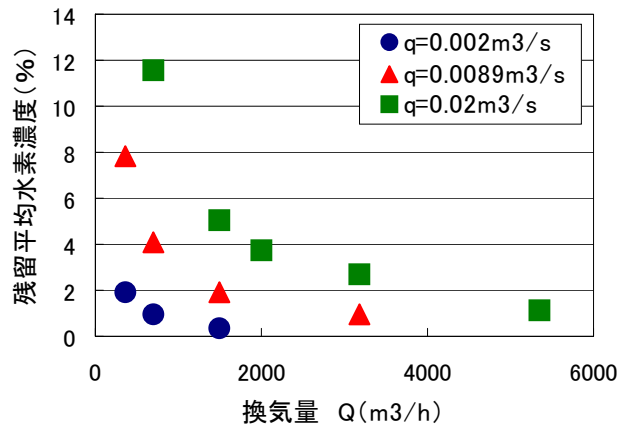


図 2.3(4)②b-5 換気量と残留水素量の関係

また、図 2.3(4)②b-6 は残留水素量を無次元化漏えい量(q/Q)で整理した結果を示す。このように、残留水素濃度はおおよそ、無次元化漏えい量で表現できることがわかった。

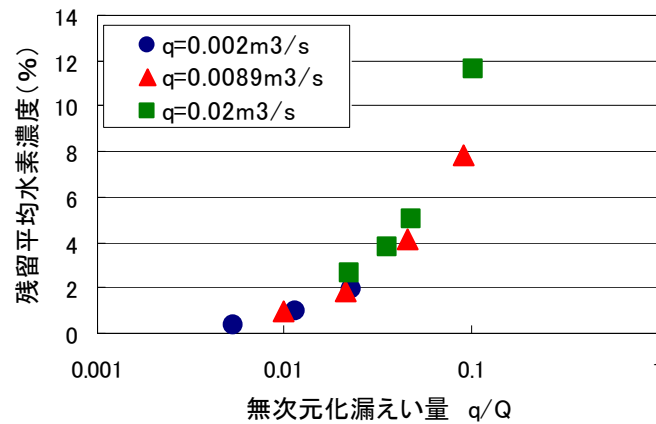


図 2.3(4)②b-6 無次元化漏えい量と残留水素の平均濃度の関係

図 2.3(4)②b-7 及び図 2.3(4)②b-8 に、漏えい量 $0.0089\text{m}^3/\text{s}$ 、換気量 $700\text{m}^3/\text{h}$ 時の、漏えい高さとの関係を示す。漏えい高さが低いほど、残留水素量が多いことがわかる。これは、上部から漏えいした場合は、比較的短時間で天井面に到達するため、ガスが薄められにくく、その分、効率的に換気が行われるためである。

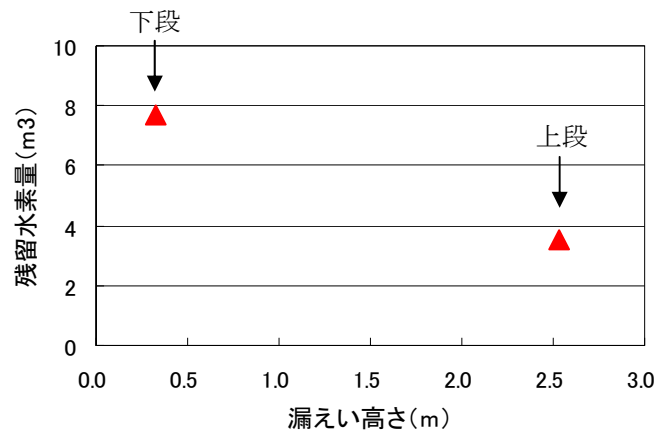
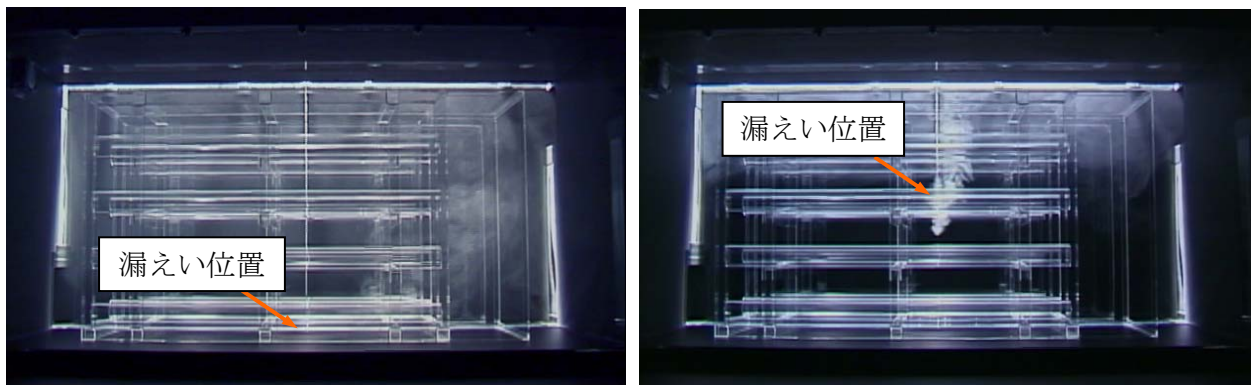


図 2.3(4)②b-7 漏えい高さと残留水素量の関係
(漏えい量 $0.0089\text{m}^3/\text{s}$ 、換気量 $700\text{m}^3/\text{h}$ 相当)



(漏えい高さ：下段)

(漏えい高さ：上段)

図 2.3(4)②b-8 可視化実験状況
(漏えい量 $0.0089\text{m}^3/\text{s}$ 、換気量 $700\text{m}^3/\text{h}$ 相当)

ウ. 爆燃シミュレーション

典型的な q/Q のケース（漏えい量 $0.0089\text{m}^3/\text{s}$ 相当、換気量 $700\text{m}^3/\text{h}$ 、 $1500\text{m}^3/\text{h}$ 及び $3190\text{m}^3/\text{h}$ ）において爆燃シミュレーションを実施した結果を図 2.3(4)②b-9～図 2.3(4)②b-11 に示す。なお、解析には後述する爆燃シミュレーションコード AutoReaGas を用いた。図に示す様に、天井付近が高濃度となっており、着火時の最大過圧 (ΔP_{max}) も天井付近が大きい。また $Q=700\text{m}^3/\text{h}$ では ΔP_{max} は 50kPa 程度と高かったが、 Q を $1500\text{m}^3/\text{h}$ とすると、 ΔP_{max} も 20kPa 以下に低下することが確認できた。

また、図 2.3(4)②b-12 は漏えい量 $0.0089\text{m}^3/\text{s}$ の条件下において、無次元化漏えい量と発生した最大爆風圧の関係をとりまとめたものである。他の漏えい条件（漏えい量、漏えい位置など）におけるデータ補強が必要であるものの、漏えい量・換気量と爆風圧の関係をおおよそ把握することができた。

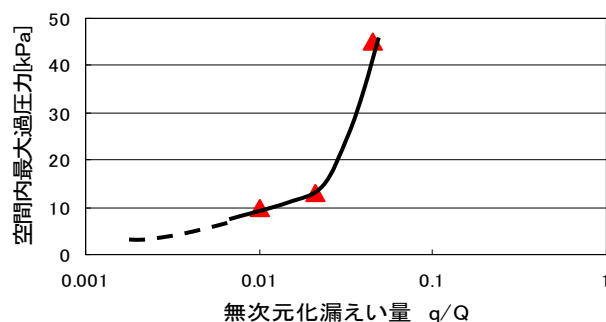


図 2.3(4)②b-12 無次元漏えい量と換気空間内最大爆風圧の関係

エ. 成果と課題

- 漏えい量が増えようが、室内に滞留する水素の量は、無次元化漏えい量（漏えい流量/換気量）で表すことができる見通しが得られた。また、無次元化漏えい量が 0.01 になれば爆風圧を 10kPa 程度まで低減できる見通しを得た。
- ただし、爆風圧に関しては、今回の実験条件の一部の条件下（漏えい量 $0.0089\text{m}^3/\text{s}$ ）における知見であるため、他の漏えい条件（漏えい量、漏えい位置など）におけるデータ補強を行うことが望ましい。
- 得られたデータはH19年度、エネルギー総合工学研究所がとりまとめる（一部、当社も執筆）「水素の有効利用ガイドブック」に反映させた。

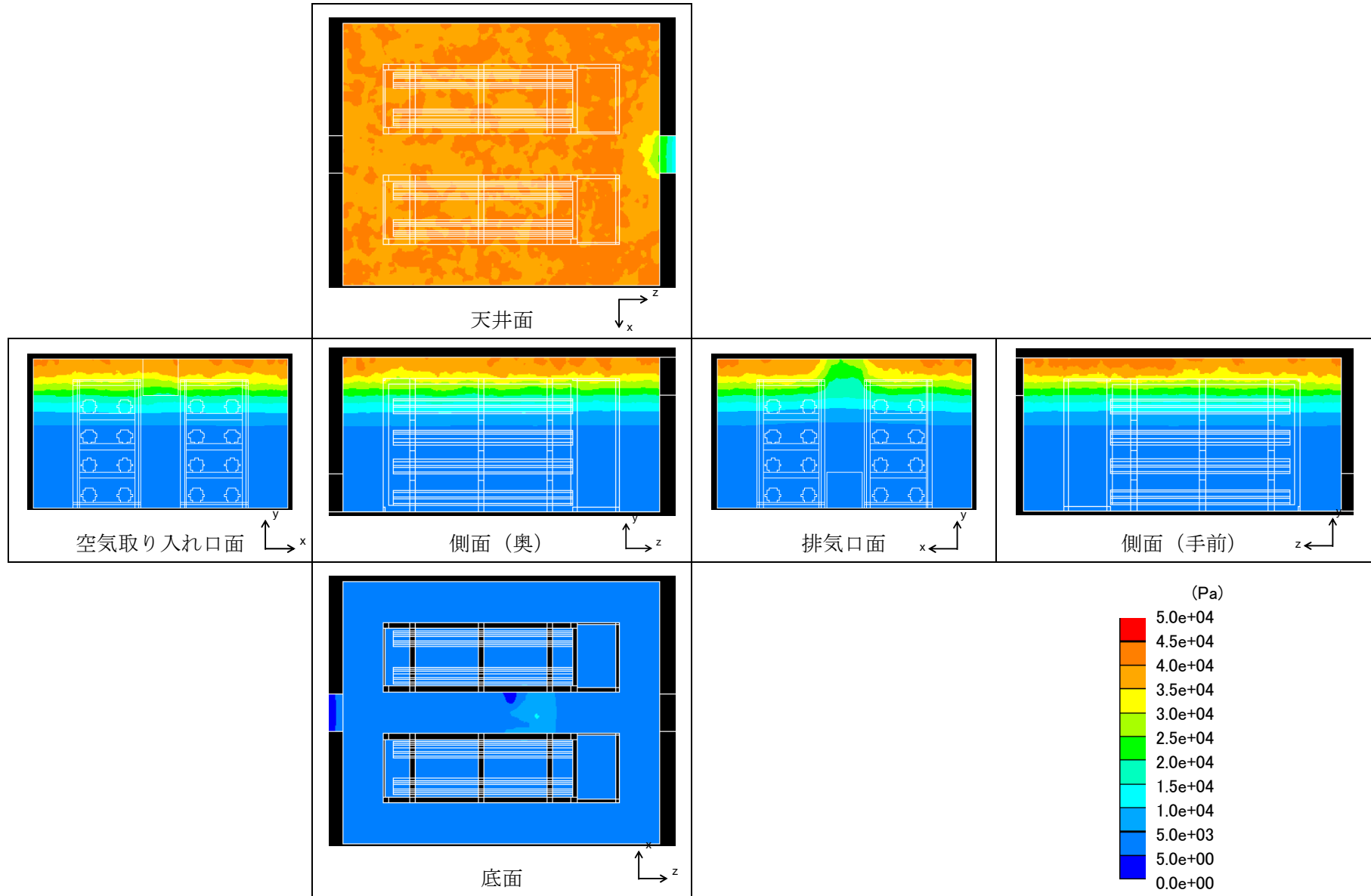


図 2.3(4)②b-9 各壁面の圧力分布 (換気量 700 m³N/h) (着火後 13ms)

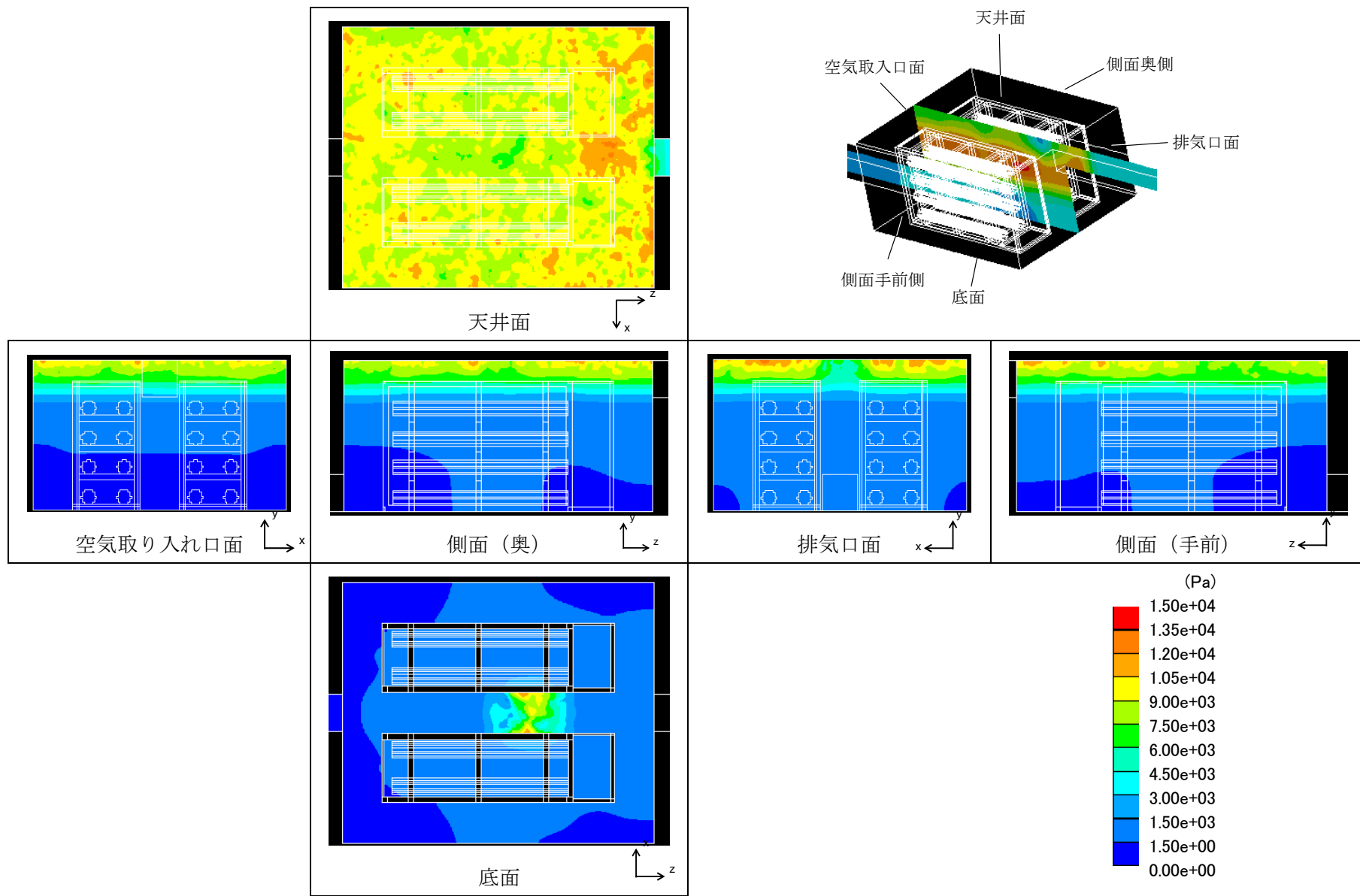


図 2.3(4)②b-10 各壁面の圧力分布 (換気量 1500 m³N/h) (着火後 12ms)

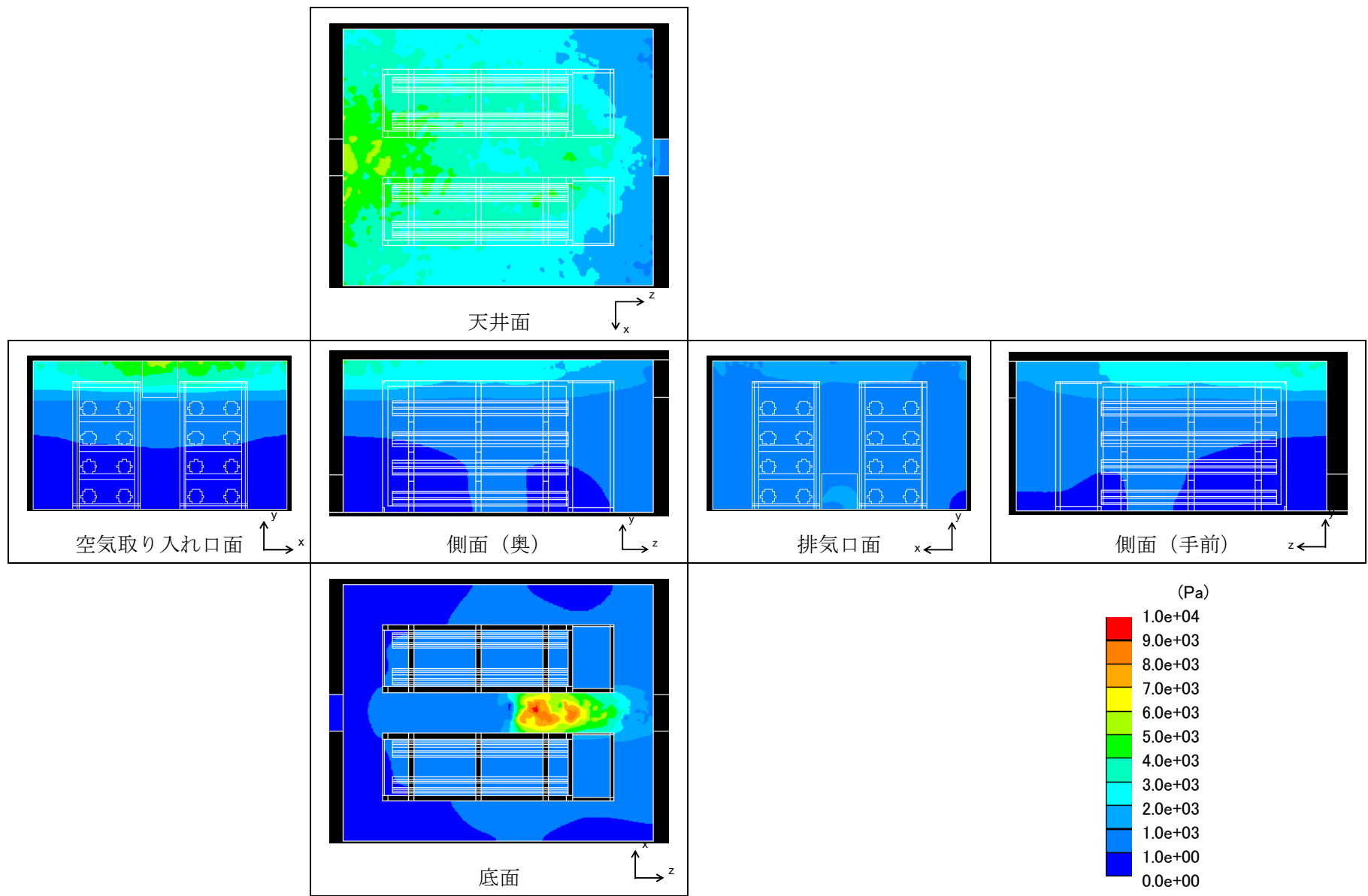


図 2.3(4)②b-11 各壁面の圧力分布 (換気量 3190 m³N/h) (着火後 12ms)

c. 爆燃・拡散現象に関するシミュレーションの精度向上

7. 検討目的

特に爆発現象は実スケールの実験が非常に困難なことから、シミュレーションの構築、および実験結果による検証が非常に重要である。ここでは、トンネルにおける爆発解析、および水素火炎からの輻射解析について述べる。

イ. トンネル内の水素拡散・爆発シミュレーション

爆燃コードの汎用性を高めるため、平成 16 年度に実施された実験データ及びエネルギー総合工学研究所で実施したトンネルを模擬した体系での水素爆発実験によるコード (AutoReaGas) 検証を実施した。図 2.3(4)②c-1 には、SRI で実施したトンネル内での爆発実験結果との比較を示す。AutoReaGas で計算した結果は爆発実験結果をよく再現していることが確認された。

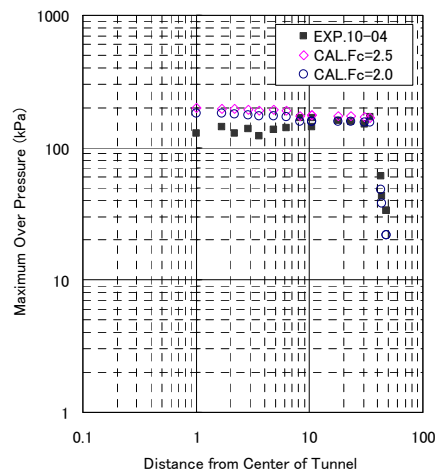
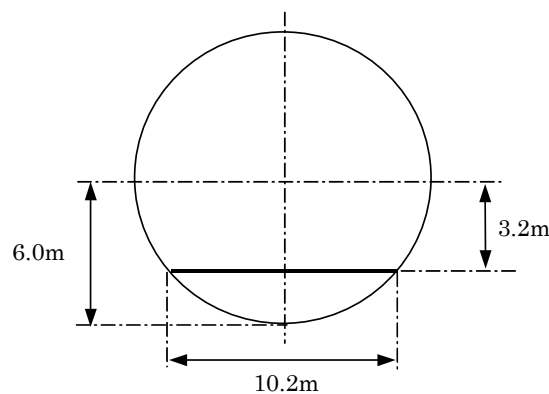


図 2.3(4)②c-1 SRI の爆発実験と AutoReaGas による計算結果の比較

次に、総漏えい量を $60\text{m}^3\text{N}$ で一定としたケースについて、漏えい時間（漏えい速度）を変化させた拡散爆発解析を行った。トンネル断面は下図のように実機スケールをモデル化した。

トンネル断面形状（トンネル長さ 392.5m）



爆発解析では、別途実施した非定常解析の濃度分布を初期条件とする。換気風速は0としている。解析条件を表 2.3(4)②c-1 に示す。

表 2.3(4)②c-1 AutoReaGas の解析ケースと初期濃度

Case	漏えい量	漏えい時間	着火タイミング
Case1-1	60m ³ N	60 秒	30 秒後 (漏えい途中)
Case1-2	60m ³ N	60 秒	60 秒後 (漏えい終了時)
Case4-1	60m ³ N	30 秒	15 秒後 (漏えい途中)
Case4-2	60m ³ N	30 秒	30 秒後 (漏えい終了時)
Case5-1	60m ³ N	15 秒	7.5 秒後 (漏えい途中)
Case5-2	60m ³ N	15 秒	15 秒後 (漏えい終了時)

着火点の位置はトンネル中央、底面 (x=0、z=0) とした。また、初期流速は拡散解析同様に0とした。爆発解析の初期濃度分布のトンネル中央噴出し付近を図 2.3(4)②c-2～図 2.3(4)②c-4 に示す。図 2.3(4)②c-5 には、計算結果例 (Case1) として着火タイミングによる圧力波形の比較を、図 2.3(4)②c-6 には着火点からの水平距離と最大過圧の関係を示す。これらの計算結果より、以下のことが判った。

- (a) 最大過圧は、短時間で全量が漏えいする場合 (漏えい速度が大きい場合) が大きくなる。
- (b) 着火点から 10m 位置において、トンネル側面および底面での最大過圧は、15s で全量が漏えいする場合において、20～40kPa 程度である。
- (c) 距離に対する最大圧力の減少率は、漏えい速度が小さい場合に大きく、漏えい速度が大きい場合には小さい傾向がある。これは、トンネル断面における水素ガスの充満率に起因すると考えられる。

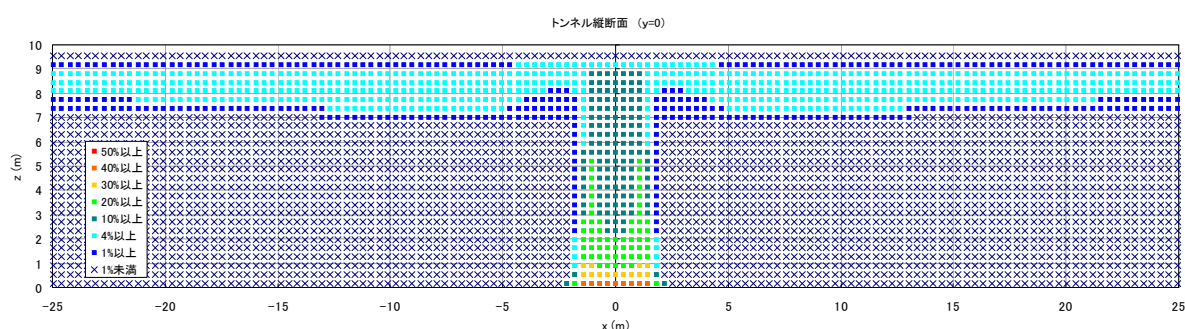


図 2.3(4)②c-2 Case1-2 (60m³N-60sec、低圧、風速 0) 60 秒後における水素濃度分布

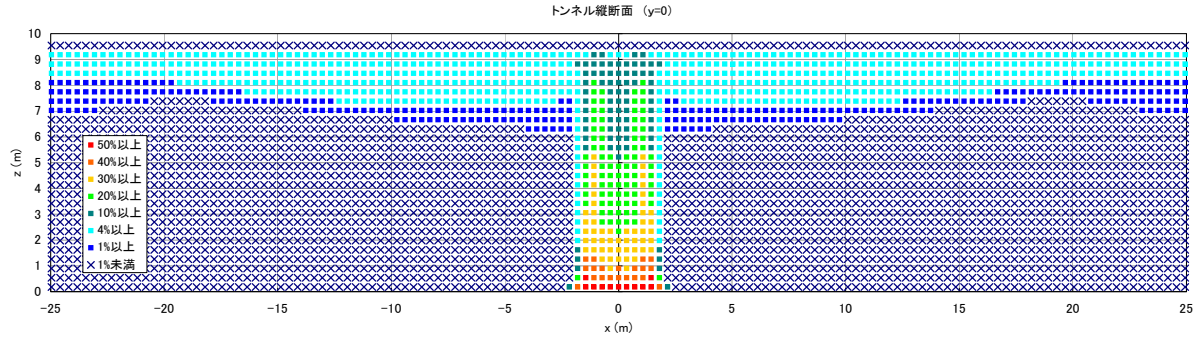


図 2.3(4)②c-3 Case4-2 (60m³N-30sec、低圧、風速 0) 30 秒後における水素濃度分布

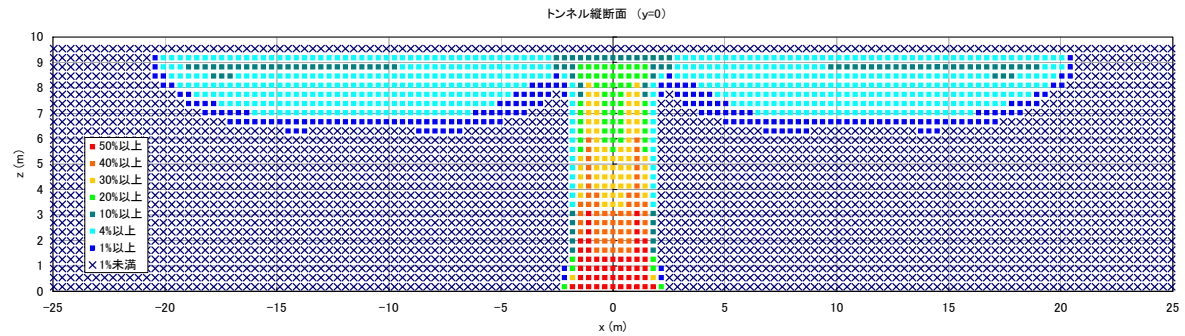


図 2.3(4)②c-4 Case5-2 (60m³N-15sec、低圧、風速 0) 15 秒後における水素濃度分布

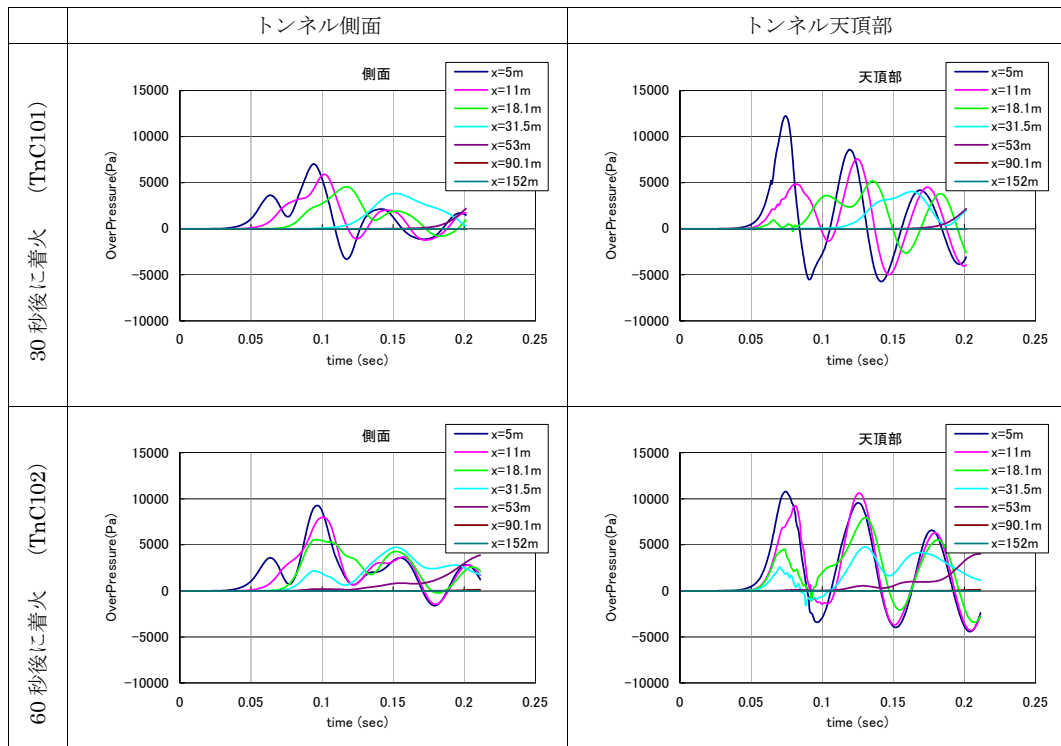
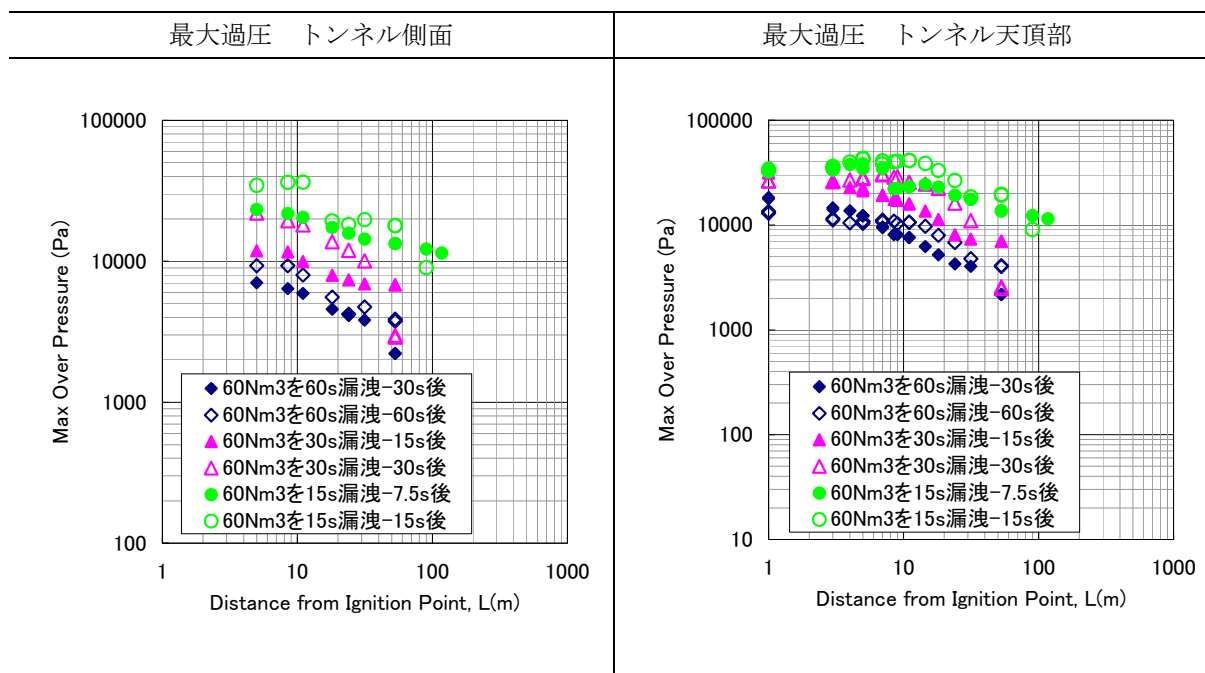


図 2.3(4)②c-5 計算結果例 (Case1) 着火タイミングによる圧力波形の比較



図②c-6 着火点からの水平距離と最大過圧の関係

次に、有効性が確認された計算方法を用いて、ローリーからの漏えいを想定し実スケールのトンネル内における着火爆発解析を行った。条件は20MPa、3000m³Nの水素が定常的に5mmの開口から流出するとの想定である。

まず拡散解析を行い、爆発計算に必要な水素濃度分布を計算した。その結果(図2.3(4)②c-7)、流水素の約80%は天井付近を下流側に拡散してトンネル外に排出され、残りの20%が爆発に寄与することがわかった。

図2.3(4)②c-8に示した爆発解析結果によると、トンネル内における最大過圧は15kPa程度であり、着火点から離れるに従い減衰し、トンネル出口(着火点から300mm)では5kPa程度となった。このように、最大過圧はトンネル内を均一30%濃度とした図2.3(4)②c-1の結果の1/10程度であり、トンネル内爆発は水素濃度に大きく依存することがわかった。

また、乱流火炎計算部分は九州大学に一部再委託し、乱流燃焼速度モデルの高度化を図った。

なお、爆燃計算に先立って、数値計算に基づいた水素ガスの拡散濃度の設定が必要となるため、トンネル内を対象として前述の模型実験結果を用いて、拡散数値計算の検証も実施した。模型実験結果と数値計算結果の比較を図2.3(4)②c-9に示す。

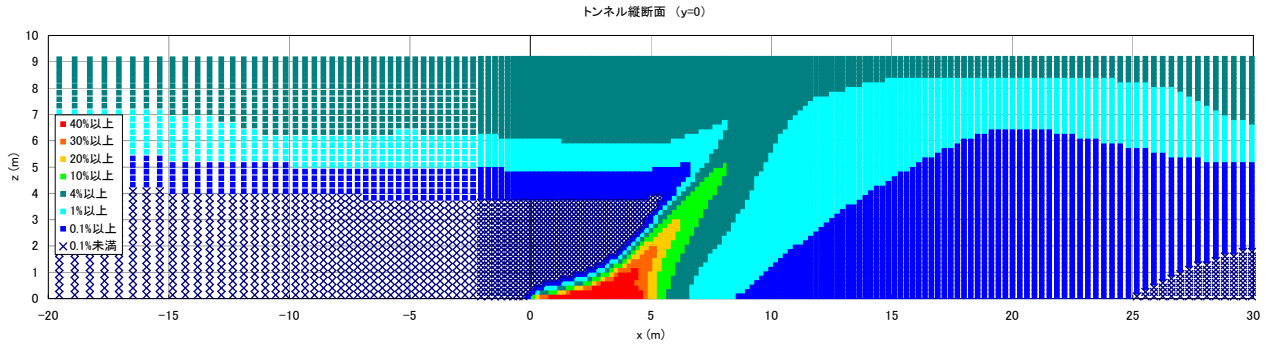


図 2.3(4)②c-7 トンネル内における水素濃度 (計算結果)

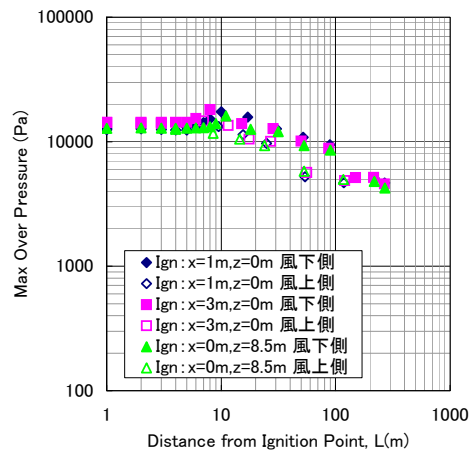
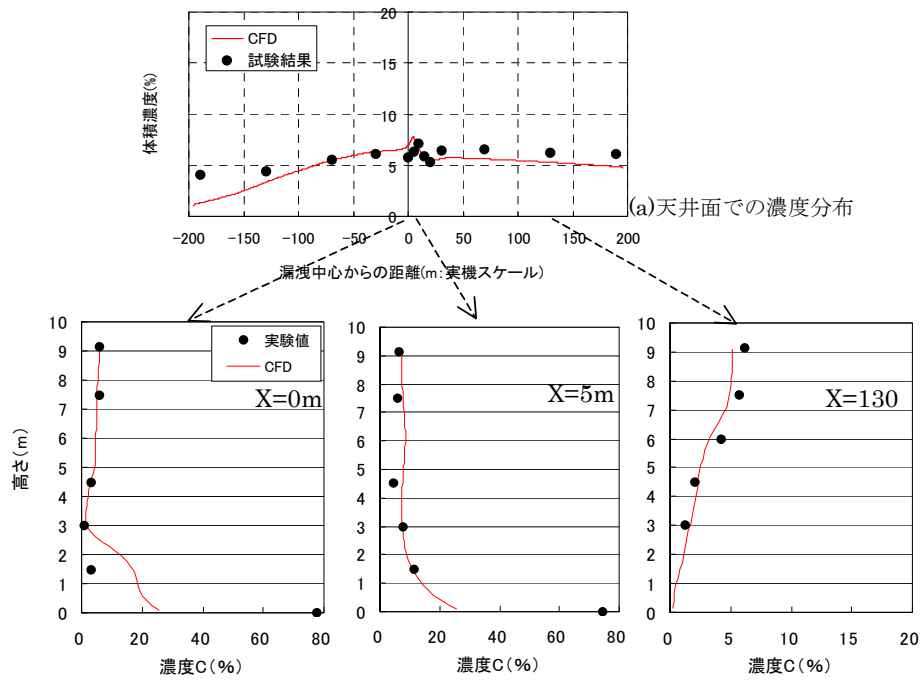


図 2.3(4)②c-8 着火時の最大過圧と距離の関係 (計算結果)



(a) 天井面での濃度分布
(b) 高さ方向の濃度分布
図2.3(4)②c-9 模型実験と拡散CFDの比較(3000m³N 漏えい時)

ウ. 水素火炎輻射に関するシミュレーションの精度向上

次に、水素火炎からの水蒸気輻射熱の解析結果を示す。水素の火炎は無色透明であり一般に輻射熱流束は通常の輝炎よりも小さいと言われている。しかし、これまでの実験や解析から明らかなように、例えば直径 10mm、圧力 40MPa の水素配管自体が破断すると、20m を超える火炎が形成されるため、周囲への輻射評価は重要な安全評価であると考えられる。

輻射解析の目的は、水蒸気濃度と温度分布を与えると、あらゆる指定した場所での輻射熱流束を計算することであり、本年度作業ではその変換プログラムを整備し、如何なる空間体系や火炎形状であっても解析が可能ないように一般化した。図 2.3(4)②c-10 に水素火炎からの輻射解析例として、 $d=0.5\text{mm}$ ϕ 、 $P=40\text{MPa}$ 火炎の輻射解析結果（ノズル端から 4m 側方および前面位置）を、図 2.3(4)②c-11 に火炎長と輻射熱流束の関係を示す。これらの結果より、圧力 40MPa において 0.5mm ϕ からの漏えいでは、漏えい口から 4m 程度離れると短時間での火傷被害は回避できること、火炎側面からの輻射熱流束 (Q) は、 $Q (\text{W/m}^2) = 1120 (L2/L1)^{-2}$ で近似できることが明らかにされた。ここで、 $L1$ は火炎長を、 $L2$ は火炎軸から垂直側方の距離を表す（火炎長は、噴出口径と圧力によって既に実験式が得られている）。図 2.3(4)②c-12 に、3 次元空間での輻射解析例として、40MPa、10mm ϕ 火炎の黒体換算温度を示す。防護壁を用いた場合に、火炎や輻射から回避されていることが判る。なお、ここで開発したプログラムは、あらゆる複雑な空間の状況に対応可能である。

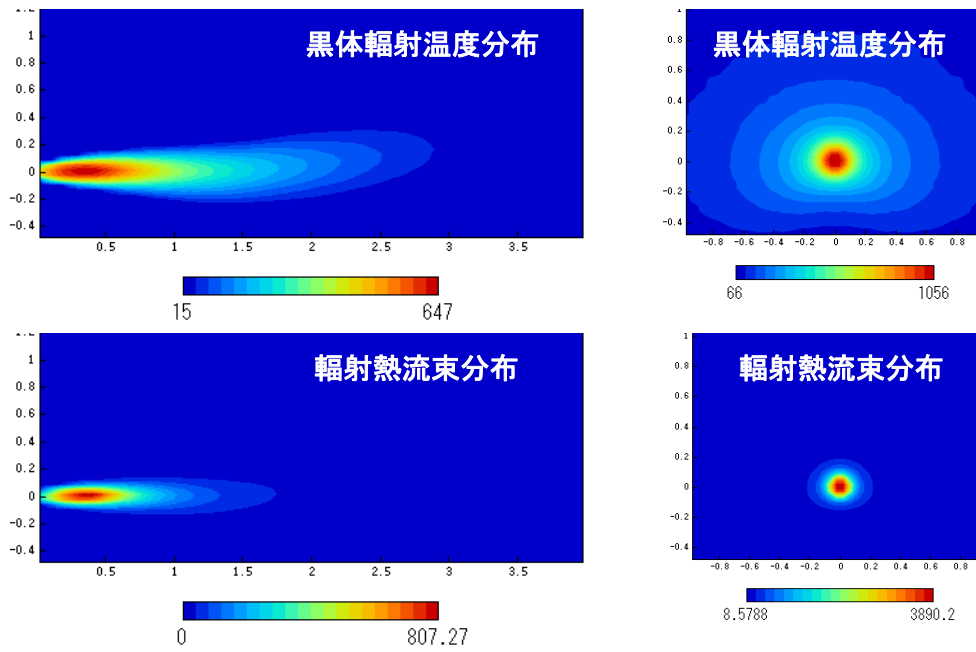


図 2.3(4)②c-10 $d=0.5\text{mm}$ ϕ 、 $P=40\text{MPa}$ 火炎の輻射解析結果
(ノズル端から 4m 側方および前面位置)

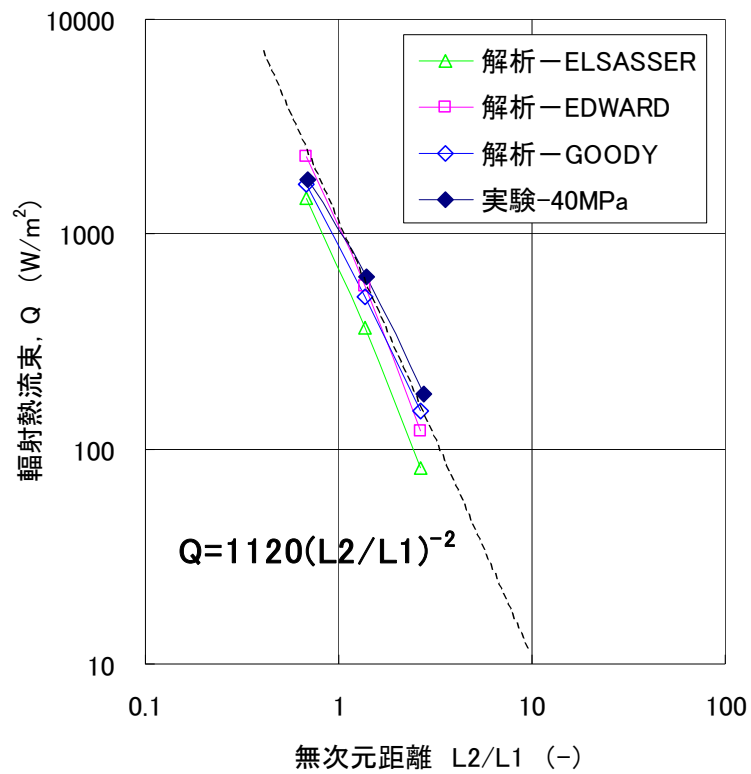
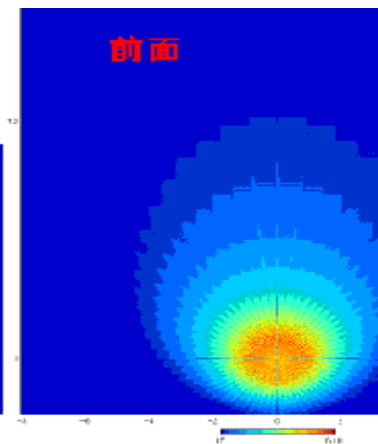
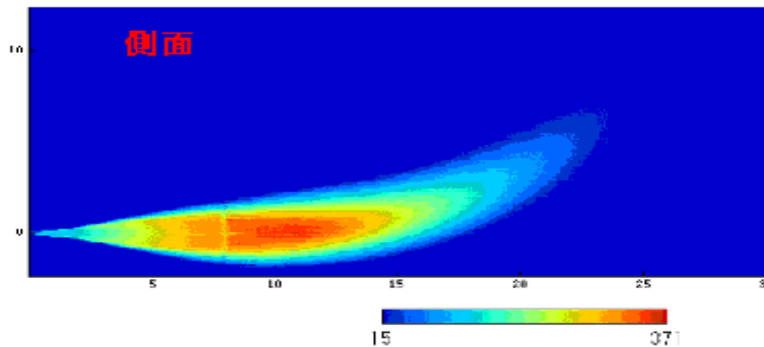


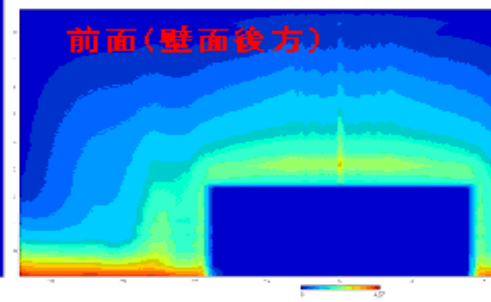
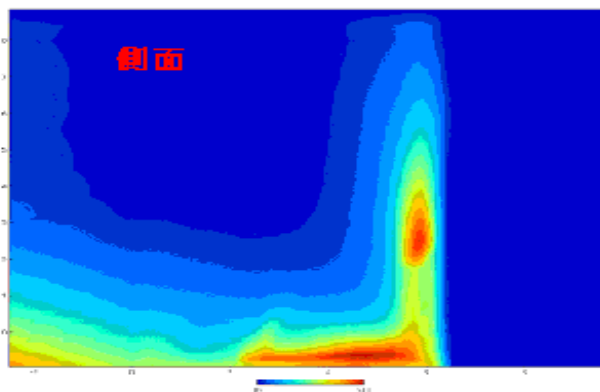
図 2.3(4)②c-11 火炎長 ($L1$) と輻射熱流束の関係 ($L2$: 火炎軸から垂直側方の距離)



PEC/MHI による実験^(*)
(秋田県 田代試験場)



同上
6m 位置に 3mH × 6mW の壁有り



(*)出典 H15～H16 年度成果報告書 水素安全利用等基盤技術開発 ―水素インフラに関する安全技術研究一、04000473-0.

図 2.3(4)②c-12 水素火炎からの輻射解析 (40MPa、10mm φ 火炎の黒体換算温度)

また、爆燃シミュレーションの精度および汎用性の向上を目指し、乱流燃焼モデルに関して検討を行った。主な成果を次に示す。

九州大学（再委託先）らが提案する乱流燃焼モデルの精度向上を図るため、水素－酸素－窒素系混合気に関して希薄混合気での火炎表面積の影響について検討した。その結果、希薄水素混合気では、火炎表面積が希薄な（当量比 λ が 1 より小さい）ほど、その影響が増加する傾向にあることがわかった。希薄混合気では、この火炎表面積の増加を考慮することにより、乱流燃焼速度の予測精度を向上させることができることが明らかになった。

また、水素－炭化水素－酸素－窒素系混合気での局所燃焼速度特性および乱流燃焼モデルを検討するため、乱流燃焼速度特性の計測・評価、2次元火炎断層写真撮影法による局所火炎変位速度の計測・評価を実施した。その結果、水素－炭化水素系二成分燃料では、希薄と過濃混合気で炭化水素（メタンまたはプロパン）の添加割合に伴う乱流燃焼速度に差異があること、この原因として局所燃焼速度特性が重要であることが明らかになった。さらに、希薄混合気については、提案する推定法による二成分燃料の平均局所燃焼速度 SL により、乱流燃焼速度の推定が可能であることがわかった。

狭い空間での火炎伝ば現象を把握するため、爆ごう下限界濃度近傍の当量比 $\lambda=0.3, 0.35, 0.4$ の水素－空気混合気について、上端開放の厚さ 10mm 幅 150mm 高さ 500mm の狭隘空間燃焼器を使用して実験的検討を実施した。その結果、ほぼ静止混合気中にもかかわらず、全ての混合気で火炎の伝ばに伴い火炎面に凹凸が発生し（いわゆるセル状火炎に移行）、火炎伝ば速度が加速され、 λ の大きい混合気ほど増大する傾向が明らかになった。ただし、断面 10×10 mm で長さ約 2000mm の両端開放のチャンネル内（火炎伝ば方向は水平方向）を伝ばする $\lambda=0.4$ 予混合火炎で見られた、開放端近傍に至っても伝ば速度が加速する現象は、本狭隘空間では観測されず、上端開放近傍では全ての混合気で伝ば速度が低下することがわかった。

エ. 成果と課題

爆燃・拡散現象に関するシミュレーション構築では以下の成果が得られた。

- (a) トンネル内に漏えいした水素の爆発に関して、濃度分布や風速を入力条件として、爆発評価が可能となった（実験による検証済み）。
- (b) トンネルにおける爆発威力は、トンネル断面における充満度に大きく依存する。即ち、換気によってトンネル内に流れがあると、水素は天井を伝わって外部に拡散されるので、着火した場合でも、火炎はトンネル上部を伝播するのみである。一方、漏えい速度が非常に大きいと、断面における充満度が増し、大きな爆発威力となる。
- (c) 輻射解析プログラムを整備し、水蒸気濃度と温度分布を与えると、あらゆる指定した場所での輻射熱流束を計算することが可能となった。
- (d) 水素火炎の側面における輻射熱流束は、実験および解析の結果、

$Q \text{ (W/m}^2\text{)} = 1120 \text{ (L2/L1)}^{-2}$ で近似できることが明らかになった。

また、課題として以下の点が残された。

- (e) トンネル解析における各種パラメータの影響。それらの結果とリスク評価から、トンネルにおける安全対策の基準を明確にし、活用できる資料としてまとめる。
- (f) 水素スタンドで想定される事故時の影響度把握用に輻射解析を適用し、保安距離を明確にする（現状では輻射の影響は小さいものとされ、詳細な評価が行われていない）。
- (g) 狭隘空間に形成された水素-空気予混合火炎を伝播する火炎の特性が、実験的に得られたが、限られた混合比と空間幅のデータのみなので、シミュレーションの検証に用いるためには、さらにデータの蓄積が必要である。
- (h) また、水素-空気の希薄予混合気における乱流火炎特性についても、実験的にかなりの部分が明らかにされた。これらを現状の爆燃シミュレーションに組み込み、広い濃度範囲において精度良い解析が可能なように整備する必要がある。

d. 液体水素蒸発モデルの検討

ア. 検討目的

水素漏えい事象の中には、液体状態で漏えいし、蒸発挙動を経て水素ガスが拡散する場合がある。この拡散挙動を予測するためには、蒸発挙動を正確に把握する必要があり、種々の漏えい状況に適用するには、蒸発部分に関する高精度な数値モデル（蒸発モデル）の開発が不可欠である。そこで、既存の実験データを基に、蒸発挙動の支配因子を把握し、より精度の高い蒸発モデルを検討し、拡散時の濃度分布挙動の予測精度を向上させる。これらの評価ツールを、今後水素に関する規制見直し作業時に必要となる、データ収集に資することを目的とする。

液体水素の蒸発は

- (a) 大量に漏えいした液体水素がプールを形成してプール表面から蒸発する場合
- (b) 地面近傍に流出した液体水素が地面や周辺の大気と熱交換をしながら、一部は液滴となって剥離し、蒸発・拡散する場合
- (c) ピンホール相当の小口径から漏えいした液体水素が、液柱を形成し、表面から液滴を剥離させながら蒸発・拡散する場合

等が想定される。まずは、ピンホール相当の漏えい口から噴出する液体水素の蒸発挙動のモデル化に着目し、実験データを基に液体水素の極近傍の界面における流力学的な液滴剥離挙動を解明し、液体水素蒸発拡散モデルの構築を図る。

4. 液滴剥離モデル

平成 17 年度には、これまでに得られた知見を基に、蒸発モデル開発のための課題整理とその課題解決のための具体的な方法や今後の調査計画を取り纏めた。検討の一部は東北大へ再委託し、液体水素既往研究におけるモデル調査、ノズルから噴出する液体水素の噴霧流 CFD（数値流体力学）モデルの構築を行った。平成 18 年度は、平成 17 年度に検討に着手した液体水素微粒化プロセス解析用ソルバーに二相エネルギー式をカップリングさせ、液体水素噴霧と極低温熱流動場の同時解析が可能な CFD モデルの構築と専用ソルバーの開発を行った。

開発した CFD ソルバーは、液体水素（液相）と周囲流体（気相）の非圧縮性微粒化噴霧乱流を温度場も含めて統一的に扱うことが可能な LES-VOF モデルでシミュレーションするソルバーである。さらに、計算領域内における微粒化液滴粒径分布算出プログラムコードの開発を行った。本解析におけるエネルギー式考慮型 LES 微粒化ソルバーは元のソルバーの仮定に基づいて、温度変化に伴う物性値の計算機能を追加したソルバーである。

(a) 解析モデル

直径 1mm のピンホールノズルから噴出する液体水素に関し、噴霧流動特性と極低温熱流動場に関する大規模数値解析を行った。本解析コード開発に当たっては、従来東北大が開発した、表面張力を有する非混合非圧縮性 LES 乱流モデルに基づくインジェクターノズル噴霧微粒化解析用ソルバー にエネルギー式を導入し、噴霧流動と温度場の同時解析が可能な極低温液体水素噴霧流解析専用ソルバーを新たに開発した。さらに、本ソルバーは温度変化に伴う物性値変化の計算機能を有し、水素の温度変化に伴う密度変化の影響が考慮されている。

液体水素ジェットの液柱から液滴への分裂へ至るまで一連の気相-液滴混相流動場に関し、LES-VOF 法を用いた一体型非定常 3 次元混相乱流解析を行い、液体水素噴出時液滴剥離のメカニズムに関する詳細な数値予測を行った。

(b) 境界条件および初期条件

計算領域に対し以下の図 2.3(4)②d-1 のような境界条件を設定する。Gamma は体積分率で、Gamma=1 が液相、Gamma=0 が気相を表す。

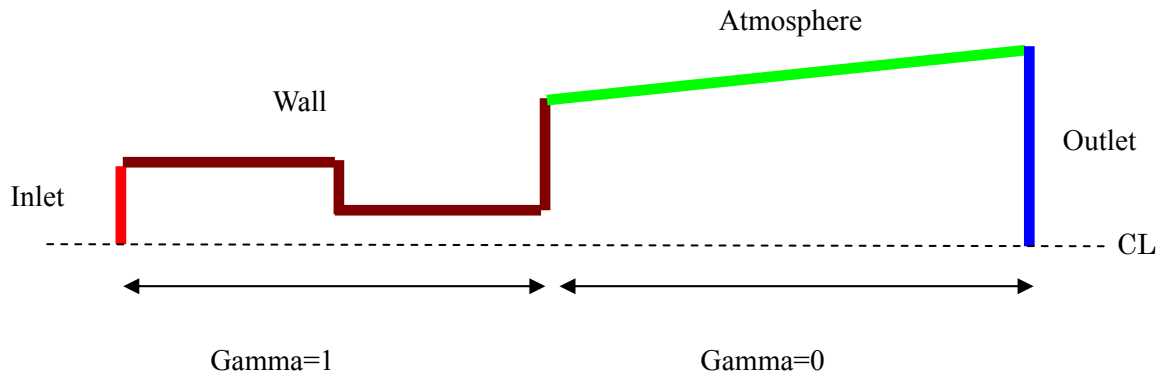


図 2.3(4)②d-1 境界条件および初期条件の設定

(c) 計算結果

解析結果の例を図 2.3(4)②d-2 に示す。

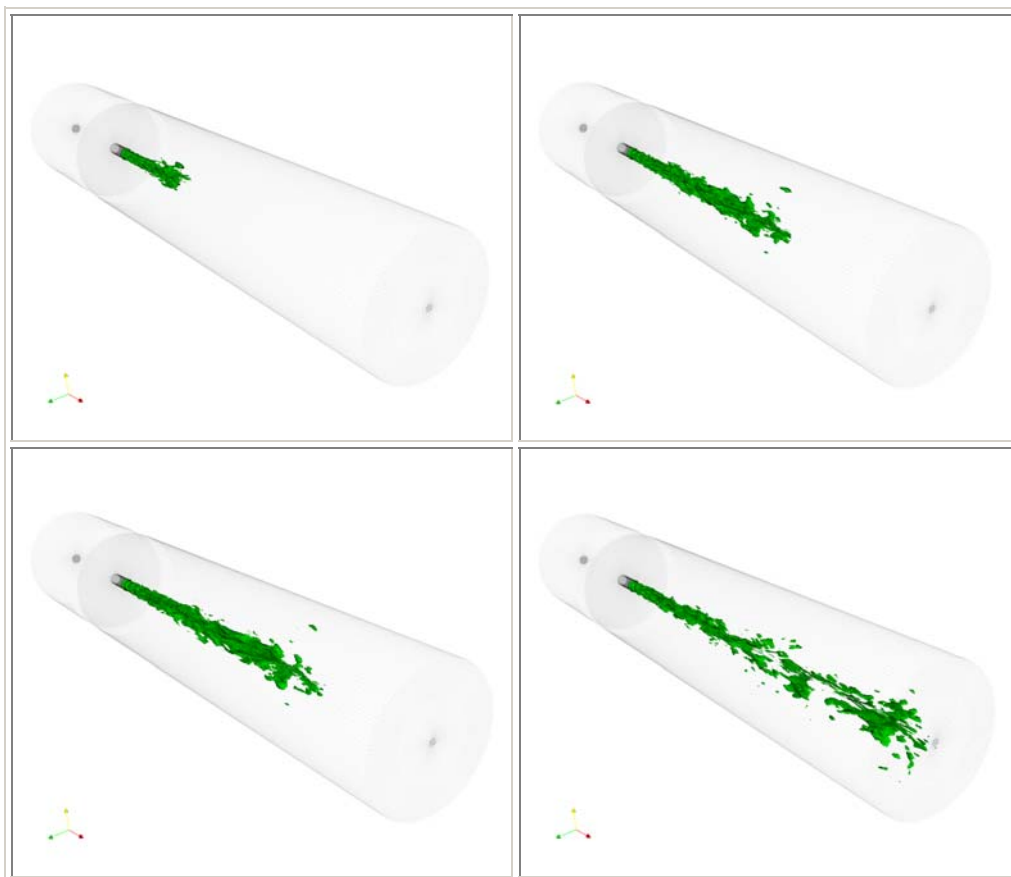


図 2.3(4)②d-2 液体水素微粒化ソルバーによる液相体積分率 ($\gamma=0.5$) の等値面に関する時間発展数値計算例

液体水素微粒化流れにおける液相体積分率 γ ($\gamma=0.5$) の等値面に関する非定常数値計算例を示す。ノズル出口から噴出する液体水素に関し、①液柱の不安定変形から分裂、②液膜の形成と液膜フラグメントへの分裂、③微粒化液滴の形成までの一連の極低温流体微粒化プロセスに関する混相流動場の数値予測が効果的に達成されていることが分かる。

図 2.3(4)②d-3 に液体水素微粒化ソルバーによる噴霧流温度分布に関する時間発展を示す。図 2.3(4)②d-2 及び図 2.3(4)②d-3 より、計算時間進行に伴い水素微粒化が活発となる状態に達した場合、あるいは液滴分裂が活発に行われている気液界面において、極低温噴霧流における温度拡散が強力に促進されることがわかる。すなわち、極低温流体においては液柱分裂時、気液界面における熱伝達特性が向上し温度拡散に及ぼす噴霧微粒化の影響が、常温流体に比較して大きく現れると言える。図 2.3(4)②d-4 は液体水素微粒化噴霧流の流速ベクトルである。気液界面近傍において流速ベクトルの逆流域が見られ、この逆流の影響により気液界面において Kelvin-Helmholtz 不安定が誘起されることにより液柱界面は波状に変形する。やがて気液界面には界面せん断力の増大に基づく微小乱流渦が生成し、変形面の巻き込み現象が生じ、曲率がある一定値を超えると液滴への分裂が生じることが分かる。

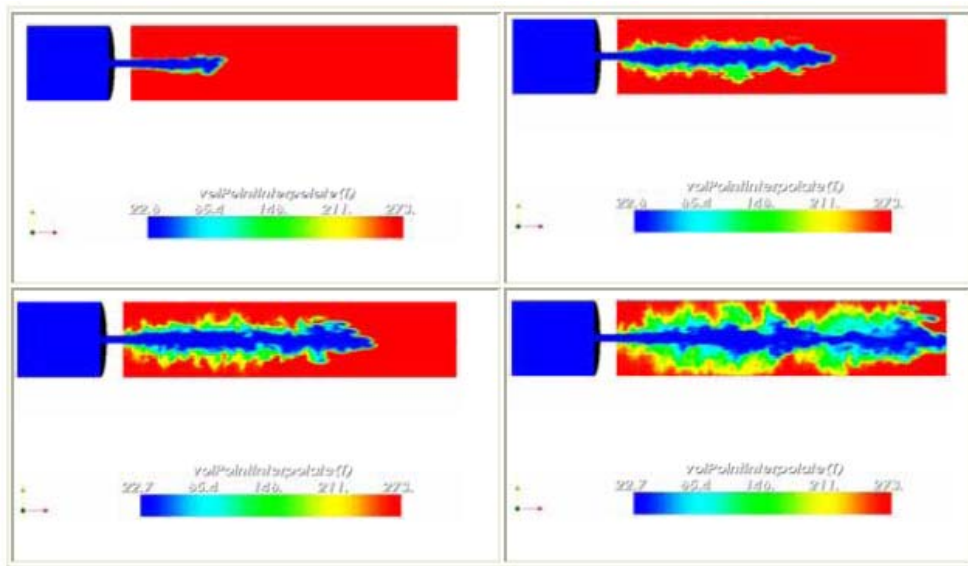


図 2.3(4)②d-3 液体水素微粒化ソルバーによる噴霧流温度分布に関する時間発展

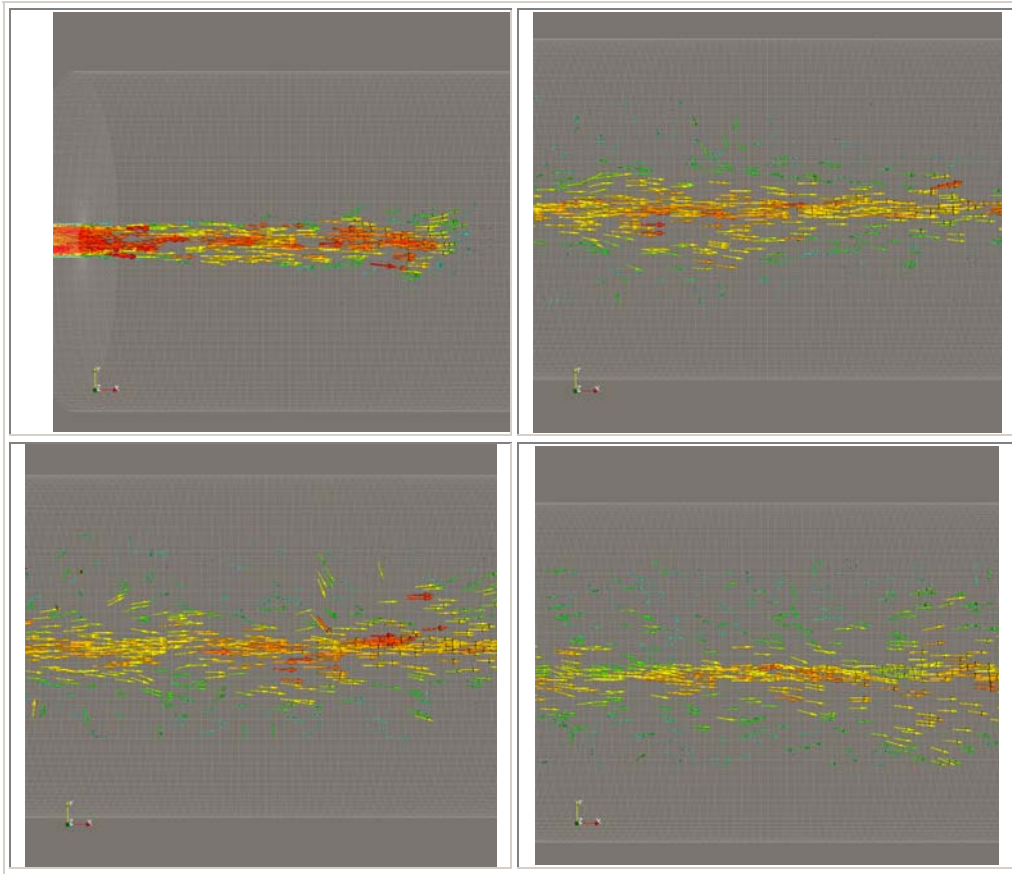


図 2.3(4)②d-4 液体水素微粒化ソルバーによる噴霧流速ベクトル分布に関する時間発展

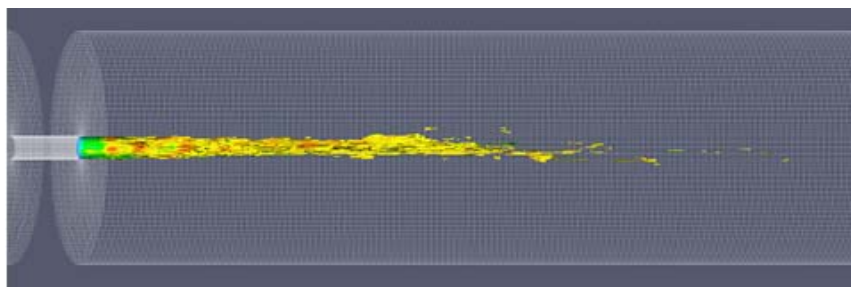
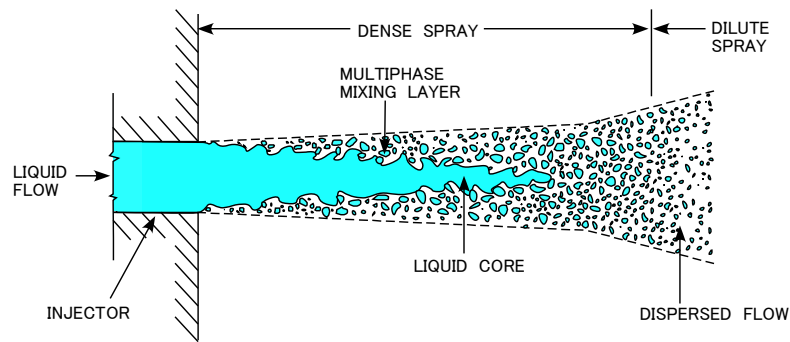
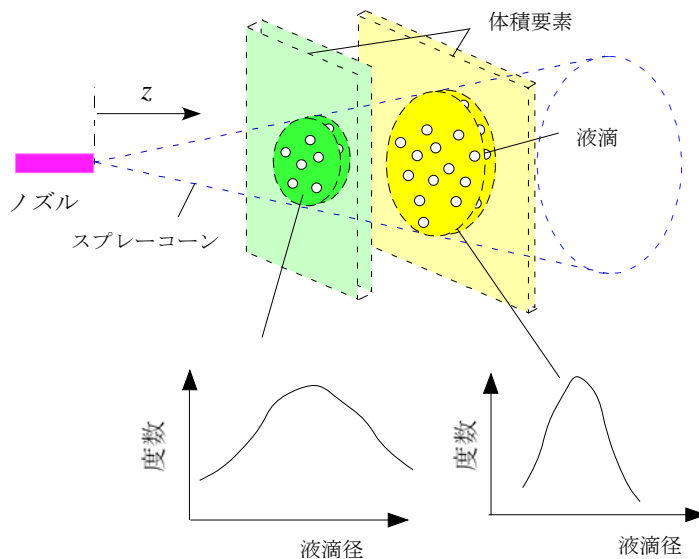


図 2.3(4)②d-5 液体水素ジェットのパテンシャルコア(分裂長さ)

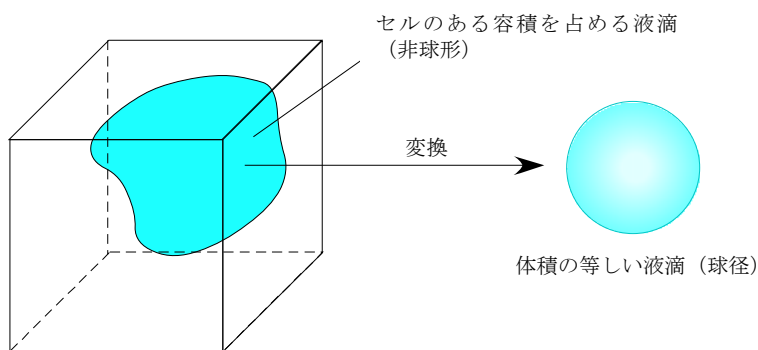
図 2.3(4)②d-5 は液体水素ジェットのポテンシャルコア La (分裂長さ)である。ポテンシャルコアは全時間ステップにおける $\Gamma=1$ (液相のみ)の等値面を抽出してスーパーインポーズし重ね合わせたものである。水のノズル噴霧においては $La=7d$ (d :ノズル径)程度であるが、液体水素の場合 $La=16d$ にも達する。これは、液体水素等の極低温流体が低粘性であり、ノズル部通過の際に発生するせん断応力が小さく、常温流体ジェットに比較して界面不安定性が誘起されにくいいため、液柱から液滴への分裂に要する距離が長くなると考えられる。

(d) 粒径分布の算出

上記の解析モデルを用いて、剥離して生成される液滴の粒子径分布を算出した。具体的な方法は図 2.3(4)②d-6 に示す通りである。



(a)液柱から剥離した液体水素の液滴径分布



(b) セル内液滴の直径の算出方法

図 2.3(4)②d-6 液体水素液滴粒径分布算出に要する具体的な手順

図 2.3(4)②d-7 に液体水素液滴粒径分布に関する計算結果を示す。噴孔直下における液滴径のピーク値は下流側へゆくに従い減少し、微粒化が促進されていることが分かる。特に下流側においては $D_p=20 \mu\text{m}$ 近傍の粒径生成頻度が増大し、下流側に行くに従い微粒化促進が効果的に行われていることが分かる。

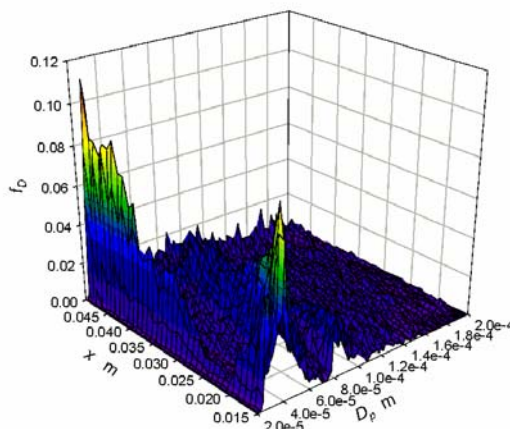


図 2.3(4)②d-7 液体水素液滴粒径分布に関する計算結果（液相体積分率 $\gamma=0.1$ ）

また、水素液滴粒径分布の噴霧主流方向分布の統計解析用ソルバーを開発し、水素微粒化液滴の粒径分布は噴孔出口から下流側へ離れるに従い微粒化が促進され最大粒径が減少する傾向にあることを明らかにした（図 2.3(4)②d-7）。今回検討したモデルによって、液体水素噴出時の液滴剥離挙動のメカニズム、発生する液滴径分布等が求められるようになった。

今後、本解析ソルバーに対して蒸発モデルを組み込むことにより微粒化液体水素の気相変化過程の予測と蒸気相生成量の算出が可能になると考えられる。

c. 液体水素の蒸発拡散モデル

多次元・多相熱流動解析コード CHAMPAGNE を用いて、液体水素の蒸発拡散挙動を精度良く模擬するモデル・解析手法を構築する。

CHAMPAGNE では、

- ア. 液体水素から水素ガスへの蒸発による質量移行
- イ. 液体と気相との相間摩擦損失による運動量移行
- ウ. 気相と液体水素の熱交換と液体水素の蒸発によるエネルギー移行
- エ. 2相流動様式（噴霧流、気泡流）

が考慮できる。これまでは、1mm 口径の噴出口から漏えいした液体水素の液滴発生挙動データをチューニングデータとして、モデルのパラメータを設定し、蒸発後の拡散挙動を求めていた。図②d-8 に例として、剥離した液滴径の分布を考慮した解析と液滴径は一様であると仮定した解析における、軸方向の濃度分布の差異を示す。

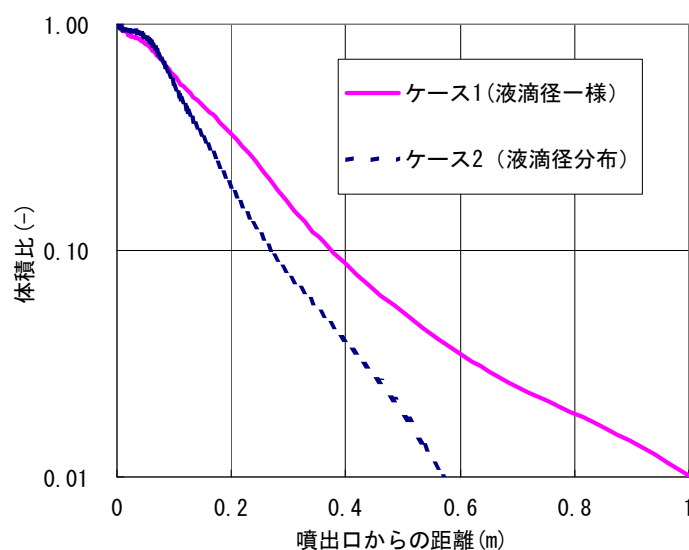


図 2.3(4)②d-8 液体水素蒸発拡散時の噴出口からの距離と到達濃度

今後は、これらの実験データに上記の液滴剥離モデルによる解析結果のデータもチューニング用データとして、さらに蒸発挙動の模擬精度を確認した上で、低温水素ガスの拡散解析を実施し、それらの予想精度も向上させていく必要がある。

エ. 成果と今後の課題

液体水素の漏えい口近傍における、液滴剥離挙動の詳細解析用ツールが整備された。今後は、液滴剥離モデルへの相変化モデルの組み込み、蒸発モデルを使った解析による液滴分布挙動に関するデータの取得、これらを踏まえた蒸発拡散解析の追加実施によって、種々の液体水素漏えいモードに対する蒸発・拡散モデルの構築が可能となる。

e. 水素基礎物性に関わる実験データ・解析結果の整理

b～d で検討した液体水素蒸発挙動、及び水素の拡散・爆発現象に関して実験、数値シミュレーション結果、及びその手法をまとめる、現状での数値シミュレーションの限界及び課題、今後必要とされる検討項目をまとめる。

ア. トンネル内で水素の漏えいが発生した際に、通常の換気風速 2m/s 程度の風速で、大幅に可燃濃度域を減らすことができることを確認（検討の過程で取得した実験データは、換気基準検討に用いるだけでなく、トンネル内の爆燃現象予測を CFD で行う際の基礎データとしても使用）。

イ. トンネル解析における各種パラメータの影響は未だ全てが明らかではない。検討結果とリスク評価の観点から、トンネルにおける安全対策の基準を明確にし、活用

- できる資料としてまとめる必要がある。
- リ. 閉鎖／半閉鎖空間においては、水素漏えい量に変化しても、室内に残留する水素の量は、無次元化漏えい量（漏えい流量/換気量）で表すことができる見通しが得られた。また、無次元化漏えい量が 0.01 になれば爆風圧を 10KPa 程度まで低減できる見通しを得た。ただし、爆風圧に関しては、今回の実験条件の一部（漏えい量 0.0089m/s）における知見であるため、他の漏えい条件（漏えい量、漏えい位置など）におけるデータ補強を行うことが望ましい。また、これらの得られたデータは H19 年度、エネルギー総合工学研究所がとりまとめる（一部、当社も執筆）「水素の有効利用ガイドブック」に反映させた。
 - エ. 想定するスタンドモデルに対して輻射解析を適用し、保安距離を明確にする（現状では輻射の影響は小さいものとされ、詳細な評価が行われていない）。
 - オ. 狭隘空間に形成された水素-空気予混合火炎を伝播する火炎の特性が、実験的に得られたが、限られた混合比と空間幅のデータのみなので、シミュレーションの検証に用いるため、さらにデータを蓄積する。また、水素-空気の希薄予混合気における乱流火炎特性についても、実験的にかなりの部分が明らかにされた。これらを現状の爆燃シミュレーションに組み込み、広い濃度範囲において精度良い解析が可能になるように整備する必要がある。
 - カ. 液体水素の蒸発拡散解析技術が整備されたが、今後は実験に加えて、これらの解析ツールによるデータも踏まえて、種々の漏えいモードに適用できるように、予測精度を向上させる必要がある。

③ 研究発表・講演（口頭発表も含む）

本事業で行った成果の外部発表は20件である。その内訳を以下に示す。

国内学会での発表 : 7件 国際学会での発表 : 7件
 国内雑誌での発表 : 3件 海外雑誌での発表 : 2件
 国内書籍の共著 : 1件

これらの外部発表は、学会誌「安全工学」および“World Hydrogen Energy Conference” “NHA Annual Hydrogen Conference”, “International Conference on Hydrogen Safety”, “International Symposium on Combustion”等、当該分野の研究者からの注目度が高い雑誌・学会での発表を含む。

また、水素の基本的性質から、利用技術動向、将来展望までの全体像を包括的、系統的に解説した「水素エネルギー読本」の作成に協力し、「水素安全」に関連した部分の執筆を担当した。

表 2.3(4)③-1 に、全発表の年月日、媒体、タイトル、発表者を示す。

表 2.3(4)③-1 研究発表・講演リスト

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
平成17年 5月26～27日	8 th Asian Hydrogen Energy Conference	Experiments on Hydrogen Deflagration	Y. Sato, H. Iwabuchi, M. Groethe, J. Colton and S. Chiba
平成17年 7月3～8日	3 rd International Conference on Materials for Advanced Technologies	Experiments on Hydrogen Deflagration	Y. Sato, H. Iwabuchi, M. Groethe, J. Colton, and S. Chiba
平成17年 9月8～10日	1 st International Conference on Hydrogen Safety	Large-scale Hydrogen Deflagrations and Detonations	M. Groethe, E. Merilo, J. Colton, and S. Chiba, Y. Sato, and H. Iwabuchi
平成17年 12月	安全工学, 44(6), 407-411 (2005)	水素の爆燃野外実験	佐藤保和
投稿中	International Journal of Hydrogen Energy, in press	Large-scale Hydrogen Deflagrations and Detonations	M. Groethe, E. Merilo, J. Colton, and S. Chiba, Y. Sato, and H. Iwabuchi
平成18年 3月12～16日	NHA Annual Hydrogen Conference 2006	Hydrogen Deflagrations in a Sub-scale Tunnel	Y. Sato, E. Merilo, M. Groethe, J. Colton, and S. Chiba, and H. Iwabuchi

平成17年 9月7～9日	第46回大気環境学会 年会	水素ガス拡散時の濃度 変動と着火確率に關する 風洞実験	河内昭紀、岡林一木
平成17年 12月14～15 日	第25回水素エネルギー協 会大会	風洞実験による水素ガ ス拡散時の濃度変動特 性と着火確率に關する 研究	河内昭紀、岡林一木、 武野計二、千歳敬子
平成18年 6月13～16日	16 th World Hydrogen Energy Conference 2006	Hydrogen Release Deflagrations in a Sub-Scale Vehicle Tunnel	Yasukazu Sato, Erik Merilo, Mark Groethe, James Colton, Seiki Chiba, Hiroyuki Iwabuchi, Yuki Ishimoto
平成18年 7月24日	Journal of Power Sources, Volume 159 (2006) 144-148	Experiments on Hydrogen Deflagration	Y. Sato, H. Iwabuchi, M. Groethe, J. Colton, and S. Chiba
平成18年 9月21日	第47回大気環境学会年会	半閉鎖空間における水 素ガス拡散挙動に關する 模型実験及び数値計 算	河内昭紀、岡林一木
平成19年1月	水素エネルギー読本 水素エネルギー協会編	第6章「水素の安全を 支える技術」	岡林一木、武野計二、 千歳敬子
平成18年6月	16 th World Hydrogen Energy Conference 2006	A Model for Turbulent Burning Velocity of Hydrogen Mixtures based on Local Burning Velocity	Masaya Nakahara, Hiroyuki Kido
平成18年8月	31 th international Symposium on Combustion	Influence of Stretch on Local Burning Velocity of Premixed Turbulent Flames	M. NAKAHARA, H. KIDO 、T. SHIRASUNA、K. HIR ATA.
平成18年9月	日本流体力学会年会2006	予混合乱流火炎の局所 火炎伝ぱ特性に關する 実験的検討	中原 真也、城戸 裕之 、白砂 貴盛、平田 耕 一
平成18年9月	日本機械学会講演論文集 (2006 年度年次大会)	水素添加プロパン予混 合乱流火炎の局所火炎 伝ぱ特性に關する実験 的検討	中原 真也、城戸 裕 之、白砂 貴盛、平田 耕 一

平成18年9月	日本機械学会講演論文集 (2006年度年次大会)	水素混合気の乱流燃焼速度に及ぼす局所燃焼速度の影響	中原真也、城戸裕之
平成18年12月	第44回燃焼シンポジウム	予混合乱流火炎の局所燃焼速度特性に及ぼす火炎伸長の影響	中原真也、城戸裕之、 白砂貴盛、平田耕一、 上田俊二
平成18年12月	第26回水素エネルギー協会大会	トンネル状空間を伝ばする水素予混合火炎の基礎燃焼特性	中原真也、城戸裕之、 原裕二郎、安川哲平
平成19年1月	第 19 回内燃機関シンポジウム	水素予混合乱流燃焼速度モデルに関する研究	中原真也、城戸裕之

④ 特許等

表 2.3(4)④-1 に、出願特許リストを示す。

表 2.3(4)④-1 出願済特許リスト

出願日	受付番号	出願に係る特許等の標題	出願人
平成17年12月08日	特願2005-354630号	着火確率予測実験装置	三菱重工業
平成18年11月20日	特願2006-312802号	着火確率予測実験装置	三菱重工業