

九州大学水素ステーション事故調査
報告書（第3報）

要約版

平成19年3月30日

九州大学水素ステーション
事故調査委員会

1. 緒言

1. 1. はじめに

平成 17 年 12 月 7 日に、九州大学伊都キャンパスの水素ステーション実証試験設備（以下「水素ステーション」という）で事故が発生した。この設備は「コンプレッサーレスの高圧水電解水素ステーションの開発」（経済産業省地域新生コンソーシアム研究開発事業）において設置された施設で、平成 17 年 11 月 15 日より年末までの予定で試運転を行っていたところ、12 月 7 日に施設内の HHEG（高圧縮水素エネルギー発生装置、High-compressed Hydrogen Energy Generator）で事故が発生した。

九州大学は、未来のエネルギーとして期待されている水素エネルギーの研究において、事故を起こした責任を重くうけとめ、事故の原因を究明するとともに、事故の再発防止に向けて万全な対策を講じるべく、事故発生直後から事故の原因に関して技術的側面からの調査を進めてきた。未だ調査段階の事項もあるものの、これまでに得られた知見を広く発信して関連分野において役立てるため、及び今後の方針をたてるために、今回、中間報告としてこれまでの調査結果を取りまとめることとした。

1. 2. 調査の体制

事故原因の調査と対策の検討は、事故調査委員会（内部調査委員会）と外部評価委員会による調査体制によって実施している。

事故調査委員会は、地域新生コンソーシアム研究開発事業の構成メンバー（九州大学、三菱商事㈱、九州電力㈱、㈱キューキ、(財)福岡県産業・科学技術振興財団）と日曹エンジニアリング㈱、日立造船㈱に、複数の九州大学工学研究院教員と（独）産業技術総合研究所の専門家を加えた形で組織した。また、本プロジェクトと関係のある大陽日酸㈱にオブザーバーとして入っていただいた。平成 17 年 12 月 8 日から平成 19 年 3 月まで、17 回にわたって委員会を開催した。表 1 に構成メンバーを示す。

外部評価委員会は、(独)産業技術総合研究所爆発安全研究センターの藤原修三センター長を委員長とし、中立な立場である公的機関の専門家 7 名により組織されたもので、九州大学大学院工学研究院により平成 18 年 1 月に設置された。アドバイザーとして、行政機関より九州産業保安監督部保安課、福岡県商工部工業保安課、福岡市消防局西消防署に参加していただいている。外部評価委員会は、事故調査委員会の方向性を指示し、事故調査委員会の提出した技術的問題とその対策の妥当性について、第三者の立場で議論し、評価を行うものである。平成 18 年 2 月 28 日に第 1 回委員会が開催され、平成 18 年 3 月までに計 8 回開催された。

2. 事故の概要

本報告書で示す時刻は、HHEG の制御システム ops2 の時刻表示に従う（4.4 節参照）。

2. 1. 発生日時

平成 17 年 12 月 7 日（水）13 時 22 分頃

2. 2. 気象状況

天候：晴れ、気温：7.3℃、風向：北西、風速：3 m/s
(ただし風向と風速は気象庁による福岡県前原のデータ)

2. 3. 発生場所

福岡市西区元岡 744 九州大学伊都キャンパス
九州大学水素ステーション

2. 4. 事故発生設備

高圧縮水素エネルギー発生装置 HHEG

2. 5. 被害状況

- (1) 人的被害：なし
- (2) 物的被害：HHEG 破損、
水素ステーションの南側に駐車中の自家用車 5 台
の窓ガラスないしボンネットに微小腐食痕

2. 6. 事故概要

HHEG の製造会社である日曹エンジニアリング(株)社員が HHEG の試運転を実施中に、HHEG 内の電解セルタンク内で電解セルが突然異常燃焼を起こし、高温高圧が発生し、安全弁から水素ガス、酸素ガスが噴出した後、同装置内の酸素分離タンク出口側の高圧酸素配管が破裂して、大爆音を発生し、圧力計、バルブ等が破壊して室内に飛散するとともに、破損箇所とガス放出管から反応生成物を含む水とガスが噴出した。反応生成物を含む水と若干数のガラス小片はステーション西側と南側の外壁から 10m 以内の範囲へも飛散した。このうち水の飛沫によって駐車車両 5 台の窓ガラスないしボンネットに微小腐食痕を生じた。

3. 設備の概要

3. 1. 水素ステーション実証試験設備

この水素ステーションの心臓部である HHEG は、三菱商事(株)が世界にさきがけて開発した、コンプレッサーを使用せずに、水の電気分解により高圧の水素ガスを直接発生する装置である。平成 16 年に、その試作機が 35MPa で 2.5Nm³/h の水素製造を達成した。

本地域新生コンソーシアム研究開発事業の目的は、この HHEG の高圧・大型化（圧力 40MPa、水素製造能力 30Nm³/h）を図り、電解特性、材料強度・耐久性、安全性等の評価解析、風力等の自然エネルギーとのマッチングの検討を行うとともに、オンサイト型水素ステーションの実証試験を実施することであった。

図 1 に水素ステーションの大まかな構成を平面図で示す。HHEG が据え付けられた部屋（以下「HHEG 室」という）は高圧ガスを製造するため隔壁（図で赤線で示した部分）で囲まれ、その西側と北側に周辺機器が設置されている。HHEG が発生した水素ガスは蓄圧器に蓄えられる。ディスペンサーは蓄圧器に貯蔵した水素ガスを燃料電池自動車に充填する設備である。HHEG は全自動で動く装置であり、運転中は（試運転中も含めて）、HHEG 室は立ち入り禁止としている。

3. 2. HHEG

図2に HHEG の概要を示す。図中、赤色が水素の配管、緑色が酸素の配管、青色は循環水、紺色は差圧検出用の水の配管を表す。固体高分子膜を用いた電解セルに水と電気を供給すると水の電気分解によって水素ガスと酸素ガスが発生する。これを閉じたタンク(図2中「電解セルタンク ECT-1」)内で行うと、ガスの圧力は上昇する。必要な圧力 40MPa (約 400 気圧)に達したところで、水素ガスを外部に取り出してやれば、コンプレッサーを使わずに高圧の水素ガスを得ることができる。一方、発生した酸素ガスは水に運ばれ、もうひとつのタンク(図2中「酸素分離タンク OST-1」)を通して大気に放出される。電解セルの固体高分子膜は水素側と酸素側の圧力差が大きくなると壊れてしまうため、常に二つのタンクの圧力差を差圧解消器で検知し、取り出す酸素の量を調整しながら圧力バランスをとる点が HHEG の特長である。

電解セルと酸素分離タンクの間を循環させる水には、電解で生じた酸素が溶解しており、また気泡としても混入している。圧力 40MPa のもとで水素発生量 30Nm³/hの運転時には、循環水には酸素がほぼ飽和溶解し、電解で発生した酸素の一部は気相のまま循環水に運ばれる。

3. 3. 電解セル

HHEGで用いている電解セルは、日立造船(株)製の水電解セルである。図3に電解セルスタックの構成を示す。左側が運転時に容器に収納された状態の断面、右側がセル構造概念を表す。電解セルは圧力容器底部(運転時は底部が上)に固定されている。セル数は 80 であり、セル 1 枚あたりのセル面積は 750cm²である。直流電流は容器側面の端子より供給される。定格電流は 1200Aである。電解セルは、陰極フランジの下に陰極給電板と陽極給電板に挟まれて 80 セル積層されており、外周に配置された 16 本のセル締め付けボルト・ナットでバネ押さえを締め付けることにより、バネを介して陽極側天板がセルを押さえつける構造になっている。

図4にセル断面を概念的に示す。図は 3 セル分を示しており、1 セルは複極板、陰極給電体、陽極給電体、MEA (Membrane Electrode Assembly、膜電極接合体：固体高分子のイオン交換膜の両面に白金の電極触媒層が接合されている)、内部シールゴム、PEEK 材 (Poly Ether Ether Ketone) のリング、外周シールゴムで構成されている。運転時には、陰極(水素発生)が MEA の上、陽極(酸素発生)が MEA の下の位置関係となっている。

複極板は各セル間の仕切りであり、気体は通さず、電気は通す。陰極給電体は生成された水素ガスと透過水(MEA を水素イオンが伝導する際に水素イオンに同伴して透過する水)の流路を確保するとともに電気を流すものであり、チタンのメッシュ板とカーボンシートを重ねたものである。中央に PEEK 材のリングが配置されている。陽極給電体は供給水と生成された酸素の流路を確保するとともに電気を流すものであり、チタンのメッシュ板とチタン焼結体の板を重ねたものである。メッシュ板と焼結体には白金メッキが施されている。MEA は陽極側と陰極側で発生する酸素、水素ガスに対する隔壁となり、水素イオンを伝導させる機能を有する。この電解セルでは固体高分子膜としてナフィオン 117(デュポン社)が使用されている。内部シールゴムは、陽極給電体内では水素流路、陰極給電体内では水供給路と水・酸素排出路をシールすることで水素と酸素が混ざらないようにす

るものである。外周シールゴムはセル内のガス・水と圧力容器内空間のガス・水が混ざらないようにするものである。シールゴムの材料としてフッ素ゴムが使用されている。以上のとおり、電解セルの構成部材は水電解セルで一般的に用いられているものである。供給された水は酸素と水素に電気分解され、酸素は水にのってセル外に運ばれ、水素はセル中央の流路を通してセルタンク内に放出される。

なお、本 HHEG 実証機に先立って製作され試験運転を行っていた HHEG 試作機（ α 機）では、電極の面積が本実証機の約 1/3、セル数が 23、定格電流が 270A であり、発生した水素をセルごとにセル外周から排出する構成となっている。

3. 4. HHEG 試作原型機・試作機の開発経緯

(1) HHEG 試作原型機（p 機）

HHEG 試作原型機（p 機と呼ぶ）は、HHEG 試作機（ α 機）の前に、三菱商事(株)、日曹エンジニアリング(株)によって開発された。水素製造能力は α 機と同じであり、35MPa で 2.5Nm³/h であった。 α 機との主な違いは、電解セルが電解セルタンクの底部に据付けられ、また陰極側はタンクのガス空間に開放されていた点である。また、p 機の差圧解消器は、ベローズを用いた方式ではなく、円筒内のピストンの動きを検知する方式であった。平成 15 年 6 月に完成し、試運転調整を行っていたところ、同年 8 月 28 日深夜に爆発燃焼事故が発生した。

同年 10 月 22 日に、日曹エンジニアリング(株)より千葉県工業保安課に提出された事故調査報告書によれば、本事故は、装置停止時に、循環水のドレン弁が微開であったため漏水が起こり、酸素分離タンクと電解セルタンクとの間の水が減少し、そのために酸素分離タンク側に水素ガスが侵入して混合気が生成され、何らかの着火源により酸素分離タンクで爆発燃焼が発生したものである。死傷者はなく、酸素分離タンク周辺の配管が大破し、電解セルは燃焼した。

この事故にもとづき、 α 機の設計においては、電解セルタンク内の保有水量を増加させるためのタンクの形状変更、漏洩防止装置及び漏洩検知装置の設置、電解セルをタンク上部に据付けて循環水が上部から出入りするように変更、などの改善が施された。 α 機は平成 16 年 2 月に完成した。

(2) HHEG 試作機（ α 機）

HHEG 試作機は平成 16 年 2 月に完成し、同年 3 月には水素製造能力 35MPa、2.5Nm³/h を達成した。同年 7 月 21 日に、電解セルタンクと酸素分離タンクとの間の差圧が解消されなかったために、電解セルが破損した。

差圧解消の不具合は、水素配管における流量制御に問題があったために起こった。そのため、流量制御方法に改善を加えて、同年 11 月に運転を再開した。この流量制御方法の改善は、実証機においても反映され、良好に作動した。

3. 5. 事故までの経緯

水素ステーションの建設は平成 17 年 1 月 28 日に伊都新キャンパスで始まり、同年 11 月 7 日に竣工、11 月 14 日に高圧ガス製造施設の完成検査合格証を受けた後、11 月 15 日

からHHEGの試運転を開始した。試運転は12月末までの予定でHHEGの製造メーカーである三菱商事(株)と日曹エンジニアリング(株)がステーションシステムの製造メーカーである大陽日酸と連携して実施していた。試運転では、各機器の作動を確認しながら徐々に水素圧力を上げ、11月24日には40MPaの、翌25日には同圧力で30Nm³/hの水素の発生が確認できた。そして、12月7日にHHEGから蓄圧器へ水素を供給する試運転を開始したところであった。

4. 事故後の状況

4. 1. 事故時の状況

12月7日当日は、9時25分にHHEGの運転を開始し、11時14分からは水素圧力を約40MPaで保持し、12時43分にHHEGから蓄圧器への水素供給テストを開始した。HHEGは約39MPaで安定して水素を供給し続けていたが、13時22分に事故が発生した。以下に示す諸記録から、事故のあらまははおよそ次のとおりである。

電解セルタンクおよび酸素分離タンクの圧力が45MPa以上に上昇し、安全弁の大きな噴出音とともに水素および酸素ガスの安全弁が作動し、ガスが放散槽を經由して放散ベントから放出され、水も断続的に放散ベントから放出された。その後、安全弁の噴出開始から約40秒後に、酸素分離タンク出口側の配管が破裂し大爆音を発生した。それとほぼ同時に一瞬閃光がみられた。圧力計などの機器が破壊しHHEG室内に飛散し、HHEG室外へも数ミリ程度のガラス小片(圧力計表示板のガラスの破片)などが若干数飛散した。その後、破損箇所からガスと水が噴出し、白煙を生じた。白煙に混ざって黒煙もわずかにみられた。水は黒色を呈しHHEG室内のほか、酸素及び水素放散ベントを通じてステーション西側と南側の外壁から約10m以内にも飛散した。白煙の発生は10分以内におさまった。

HHEGは隔壁で囲まれ運転中は立入禁止としており、外壁の外側周辺にも通行人はいなかったため人的被害はなかったが、水素ステーション外部での物的被害が後日発見された。

4. 2. 破損状態の調査

事故の原因をつきとめるために、HHEG室内の事故の痕跡を調査するとともに、HHEGの配管の変形・損傷状態の計測や、各機器の点検、残留物の分析を行うとともに、電解セルタンクの内部状態を詳細に調べた。

4. 2. 1. 酸素配管

HHEGの破損は、酸素分離タンクOST-1から酸素を大気へ送る高圧酸素配管系において著しかった。図5に示すとおり、破壊した部位は、OST-1出口の三分岐継手の後流のうちガスクーラーGC-1から液面計ドライレグにつながる呼び径1/2インチ配管P-7、三分岐継手の後流のうち配管C1186をへて安全弁SV1-01に至る緊急放出配管中の水平配管C1116に取り付けられた圧力計PG-OST1の根元部及び圧力計自体(ブルドン管)、同じく水平配管に取り付けられた圧力伝送器PIRA-01へつながる配管の根元、同じく水平配管から分岐して減圧弁へ至る途中のエア作動弁AV-06とその配管接続部、三分岐継手の後流のうち通常放出に用いられていた配管(C1189)途中のフランジである。

- (1) 配管 P-7: 配管 P-7 の一部は三分岐継手から離脱しドライレグ側も破断して、HHEG 室北東角付近の土間に落下していた。落下した配管は三分岐継手側が延性破壊しており、もう一端は燃焼して落下したようである。P-7 のガスクーラー側に残存した配管のステンレス鋼も燃焼していた。P-7 は三分岐継手側ほど塑性変形による径の増大が著しく、三分岐継手側の破壊部では複数の破片が生じた。
- (2) 配管 C1189, C1186: いずれも塑性変形して径が太くなっていたが、三分岐継手に近いほど塑性変形量が大きかった。
- (3) 水平配管 C1116 と圧力計: 塑性変形して激しく膨らんでおり、特に両端部で変形が著しい。C1116 に接続された圧力計 PG-OST1 へつながる配管の根元溶接部、及び圧力伝送器 PIRA-01 へつながる配管の根元溶接部で破断していた。前者の破断部は楕円形にえぐられていた。えぐられた部分は黒くなっていたが、えぐられた部分の破面様相から激しい火災は起こっていないように見えた。圧力計と楕円形のえぐられた部分は飛散し、床に落ちていた。飛散した圧力計中のブルドン管も破裂していた。飛散物の破面を走査型電子顕微鏡 SEM で観察したところ、破面は配管表面に対して斜めになっており破面には伸長ディンプルが形成されていた。このことから、配管のえぐられた部分はせん断破壊したと推定され、言い換えると、配管は高い内圧で延性破壊した。
- (4) エア作動弁 AV-06: 本体は HHEG 室北東角付近、蓋は HHEG 室北側土間に落下した。本体は、取り付け金具（長方形の板状のもの）を大きく西側へ変形させ、ボルトを破断し、西向きに飛行して、HHEG 室西側境界のエキスパンドメタルに衝突した後、土間に落下したと推定された。一方、蓋は東向きに飛行し、飛翔方向にある安全弁 SV1-02、SV1-03、電解セルケーブルの被覆などを傷付けたと推測された。バルブの二次側配管は南東側へ大きく振られて変形し、減圧弁 RV-03 の 2 次側の圧力計の前面カバーを破損させた。
- (5) 酸素放出ラインのフランジ: フランジの間に隙間ができ、フランジ面には放射状にえぐれた筋が形成されており、火災が起ったと推定した。
- (6) なお、酸素放散槽の蓋が激しく塑性変形していた。

4. 2. 2. 水素配管

水素配管については次のとおりである。

- (1) 電解セルタンクは外形上、外観上、変化は認められない。
- (2) 電解セルタンクから水素を取り出す配管 B1083 (図 6) も、特に大きな変化は見られず、外径変化は認められなかった。管の内面に黒色物が残存していたが、その量は後述の循環水配管に比べると少ない。
- (3) 水素放散槽の蓋は、激しく塑性変形していた。
- (4) 安全弁 SV02-1 の元弁のリークポートに噴出跡があった。

4. 2. 3. 水配管

次に、電解セルと酸素分離タンクの間で、水を循環させる循環水配管について述べる。

- (1) 電解セルタンク ECT-1 への循環水入出力配管 B1084(40A), B1082(40A)のいずれも表面が黄色に変色しており、表面温度は 400℃程度まで上昇したと推定される。このうち、電解セルから OST-1 へ水を送り返す配管 B1082 は、変色とともに全面塑

- 性変形で管がふくれていた。OST-1 から電解セルへ水を供給する配管 B1084 に塑性変形による径の肥大は認められない。いずれの管も内側に黒色の付着物があった。
- (2) 電解セルタンクから酸素分離タンクへ向かう配管で、電解セルタンクに近い位置ほど外径が大きくなっている。一方、酸素分離タンクから電解セルタンクへ水を供給する配管は、水循環ポンプの手前までは太くなっているが、ポンプから電解セルまでは変化は認められない。
 - (3) 差圧解消器のベローズは激しく変形をうけたかのようなのである。全長、設計時 960mm が 1195mm まで伸びていた。最大 7.1kPa の水圧をベローズ側にかけて気密を調べたところ、7.1kPa で気密は保たれた。
 - (4) 水循環ポンプと純水供給ポンプの分解点検の結果、特に異常は発見されなかった。

4. 2. 4. その他の機器

各測定機器の事故後の状態を検査した。

- (1) 酸素分離タンクの液面測定のための圧力伝送器のひとつにゼロ誤差、スパン誤差が生じていた。
- (2) 温度センサー（測温抵抗体）については、酸素分離タンク酸素出口に設置された TIA-04 は配管 P-7 破損に伴い破断していたがセンサー自体は正常だった。電解セル循環水出口に設置された TICA-03 は溶断していた。電解セル水素出口の TIA-21 は破断していたがセンサー自体は正常だった。それ以外の温度センサーは正常だった。
- (3) 安全弁は、機能上の異常は認められなかった。
- (4) ガス検知器については、水素検出器、酸素検出器いずれも正常だった。

4. 2. 5. HHEG室内

多くの破損物が散在し、配管破裂部から噴出した黒色水が天井のテント、壁面、床面に付着していた。そのほかには、

- (1) 鋼鉄扉の東隣に 2 箇所、焼けた跡があった。これはエア作動弁 AV-06 の本体、及び配管 P-7 が落下する際に衝突した跡と推測された。
- (2) 西側エキスパンドメタルに AV-06 の衝突した痕跡が認められた。

4. 2. 6. 水素ステーション外部

水素ステーションの外部には、圧力計のガラスの破片等が飛散していたが、物的被害は事故直後には発見されなかった。しかし後日、水素ステーションの南側にある機械系実験棟 EN41 前に駐車していた車両 5 台の窓ガラス、ないしはボンネットに幅 1~2 ミリ程の複数の微小腐食痕が発見された。事故時に水素放散ベント、あるいは酸素放散ベントからステーション周囲へ飛散したフッ化水素酸を含んだ水（次項参照）の大部分は車両駐車位置までは到達していなかったが、少量の飛沫が到達し腐食を生じたと推定された。

4. 2. 7. 残留物の元素分析

事故時に HHEG 室内に噴出した黒色物と配管のドレンから採取した水について、固体は SEM-EDAX（走査電子顕微鏡+エネルギー分散 X 線分光法）、ESCA（X 線光電子分光法）などにより、液体は ICP 発光分析（誘導結合高周波プラズマ発光分析）、イオンクロマトグラフィーにより化学分析を行った。配管内の残存水はさまざまな色を呈し、フッ素イオン、スルホン酸イオンを含み酸性を帯びていること（pH は 2.5~6）がわかった。

また、フッ素以外にチタン、鉄、クロム、炭素、酸素が共通に含まれていた。一方、黒色物は数ミクロン以下から大きいものはミリオーダーの粒子ないし粒子の集団で、顕微鏡観察から破片状、薄片状、粒状、球状、それらが鎖のように連結したものなど様々な形が認められ、金属光沢を呈するものもみられた。構成元素として、最も顕著なものはチタンで、その他に鉄、クロム、ニッケル、炭素、フッ素などが認められた。これらの分析結果から、噴出した物質は、電解セルの構成部材の反応物であると判断された。

HHEG 分解後には配管内壁、機器内部の残留物の SEM-EDAX による元素分析を行った。配管は切断して分析に供した。その結果、酸素配管系の損傷部付近をはじめ、黒色水が行き渡った部位に、チタン、炭素などが検出され、事故によって循環水がセル材料ないしは反応生成物を運んだことがわかる。酸素分離タンク OST-1 から水循環ポンプ P-1 を経て電解セルへ至る循環水配管中、水循環ポンプの ECT-1 側に設置されたフィルター中からは、チタン単体（粒状捕捉物）、チタン酸化物、カーボン（糸状）、炭素、フッ素の化合物（ゴム状捕捉物）などが検出された。電解セル構成部材の未反応の破片がフィルターまで到達していたことを示している。

4. 3 電解セルの調査

4. 3. 1 電解セル

電解セルタンクから取り出した電解セルは、図 7 に示すように、全体的に燃焼したような状態であった。電解セルの残骸の、SEM-EDAX と XRD (X 線回折) による分析結果から、チタン、炭素、フッ素など、循環水とともに電解セルから酸素分離タンクを経て外部へ噴出した黒色物と類似の成分が検出された。電解セル表面の大部分は容易に人の指の力で崩れおちるほどもろいが、陽極給電板をセル層から取り外して観察したところ、内部は黒色のほか褐色、青紫色など、表面のもろい黒色物より硬いさまざまなチタン酸化物、フッ化物として検出され、損傷の激しい No.8, 9 ボルト付近の電解セル下層外周は酸素リッチ、そこから遠い外周では炭素リッチである。白金と銅も確認された。

電解セルは正常な状態に比べて全体的に上下方向に平均 17.7mm 縮んでおり、その分、電解セルを押さえつけていたばねが伸びていた。一方、16 本の電解セル締め付けボルトのうち、2 本 (No.8, No.9) が溶断しており、その隣の 1 本は塑性変形してやや曲がっていた。さらに、締め付けボルトの先端位置の計測から、先端が横方向に (上記の 2 本のある方向とは反対の方向に) およそ 10mm 程度移動していた。すなわち、電解セルは全体的にせん断変形していた。以上から異常反応は溶断した締め付けボルトの位置の近傍で最も激しかったと思われる。図 8 は電解セルタンク内の電解セルを下方から見た図であり、締め付けボルトと電解セルの位置関係を示す。

電解セルの内部の損傷状態を調査するために、(株)日立製作所において電解セルの X 線 CT スキャンを実施した。撮像装置は HiXCT-6M であり、撮像法が第 3 世代、X 線エネルギーは 6MeV である。撮像は、高さ方向に 1mm のピッチで行った。その結果、セル内部も大部分が元の状態を維持していないことがわかった。部位による違いは主に以下のとおり。

- (1) 陽極給電板のあるセル下部 (CT 測定時は上部) ほど反応が激しかった
- (2) セルの上部では、陰極給電板から 40mm くらいまでの範囲に、セルの層構造とチタ

ン電極のメッシュが残存していた

- (3) チタンの反応物（主として酸化物）がセルの下部に移動し、セルの上部に空洞ができていた
- (4) 最も激しいチタン反応部の上に最も大きな空洞ができた
- (5) 内部シールゴム部には炭化チタンないしフッ化チタンが生成した（観察と分析結果とあわせて推定）
- (6) 外周シールゴム部は炭化物が生成した（密度 1.0g/cm^3 程度）
- (7) 循環水の供給口の損傷は比較的軽微で、セルの層構造を一部とどめていた
- (8) 循環水の排出口付近は、セルの層構造がほとんど残っていなかった

以上のとおり CT スキャンにより、セルの内部状況を詳しく把握することができた。空洞のでき方から判断して、最も反応が激しかった位置は、外観からも想像された締め付けボルト位置 No.8, 9 付近であったと推測できるが、反応がどのように始まり、拡大したかについての情報を抽出することはできなかった。

4. 3. 2 電解セルタンク

電解セルタンク (SUS316L 製) の内壁には幅約 75mm、高さ約 54mm、平均深さ 5mm、最大深さ 9mm のくぼみが生じていた。くぼみは、ほぼ上述の電解セルの激しく損傷したと思われる位置（電解セル締め付けボルト番号 No.8, 9 の破断部付近）に相対する位置にあり、電解セルの異常反応でボルトが溶断した現象に伴って起こったものと推測された。くぼみ面は、溶解したというよりも、激しくエロージョンを受けたような様相を呈していた。このことは、セル内の高温の反応生成物、ないしは破損物が、セルの当該位置から強く噴出した可能性を示唆している。また、噴出の反力によってセルがせん断変形した可能性がある。

4. 4. 運転の記録

HHEG は 2 台の制御システム (ASTMAC システム : ops1, ops2) によって制御されており、これらは圧力、温度、流量、バルブ開閉などの運転データ、及びオペレーションガイドや警報の発生状況などのデータ (ログデータ) を記録していた。圧力、温度などの記録間隔は 2 秒である。圧力と温度の主要な測定点の位置は図 2 に示したとおりである。また、HHEG 室の北側フェンスに取り付けられた監視カメラにより VTR (音声なし) に HHEG 室の映像を記録していた。なお、制御システムと VTR との間に時計のずれがあり、ここでは時間表示は ops2 のタイムスタンプを使用する。図 8 に事故前後の各部の圧力と温度を、図 9 にバルブの開閉状態と VTR から読み取れる現象を示す。

事故の最初の異常が起こる 13 時 22 分 36 秒 (以下「13 時を省略」) までは、VTR にも ops2 記録データにも異常はみられず、HHEG は安定して 39MPa の水素供給を続けていた。

(1) 22 分 36 秒 : 電解セル電圧が 179.4 V から 161.5 V に低下し、電解セル電流が 992.5 A から 1002.6 A に上昇した。また、蓄圧器への供給水素ガス流量 FIC-21 の急激な増加と計測器のレンジオーバー警告が発せられている。VTR では、電解セルタンク上部の水素配管が揺れはじめ、画像全体も 4 秒ほど揺れた。その間、水素配管継手からガスの噴出が認められる。揺れは、圧力の上昇によって安全弁 SV2-01 が突然開いたためと考えられる。したがって、この時点ですでに電解セルの異常により、電解セル内の圧力は上昇を開始し

ていたと推測される。また、異常によって電解セルの一部は破壊され、その結果として電解セル電圧と電流の上記変化が生じたことが考えられる。

(2) 22分38秒：電解セルタンク、酸素分離タンクのいずれのタンクの圧力も上昇し始めている。電解セル出口における循環水温度 TICA-03 は急上昇し、電解セルタンク液面が急増した。この時点で、水循環ポンプは運転中であり、電解セル入口における循環水温度は 22℃台を維持していた。HHEG は、電解セルおよび差圧解消センサーの差圧異常を受けて差圧解消バイパス弁を開き(23分00秒まで)、電解セル電流停止、緊急放出、緊急降圧、水素供給停止の動作を実施した。

記録された最高圧力は約 55MPa であったが、後述するとおり実際の圧力はこれ以上であったと推定された。

(3) 22分40秒頃には、電解セル槽内部の水素ガス温度が上昇をはじめ(45秒頃に 100℃を超えた)、VTR において水素取出し配管からうっすらと蒸気がみられた。酸素分離タンク内の液面が酸素ガス出口配管の位置以上にまで高くなっている。

(4) 22分45秒頃に、電解セルタンクと酸素分離タンクの圧力はピークを示し、その後ゆるやかに低下して 50秒頃までに 42MPa 弱に低下した。圧力低下に伴って、安全弁はほぼ閉じたと考えられる。

(5) 22分55秒頃に水循環ポンプが停止した。59秒から水素配管の安全弁 SV2-01 の元弁が、蒸気が薄く見える程度で、数度にわたって噴出した。

(6) 23分00秒頃から、電解セルタンクと酸素分離タンクの圧力が再びゆっくりと上昇を始めた。

(7) 23分17秒には、安全弁 SV2-01 の元弁のリークベントから強く噴出しはじめた。その直後に、酸素配管で破裂が起り、18秒に閃光を發した。その後、約1秒間画像は欠落した(ビデオ装置の問題であることが後日判明)。これと時をほぼ同じくして、エア作動弁 AV-06 に弁開放の命令が送られており、その直後に弁閉止の命令が送られている。

(8) その直後の 23分20秒には酸素分離タンク出口の温度 TIA-04 が急上昇し、一方 VTR 画像に映された範囲は噴煙につつまれ、酸素配管ヘッダ管付近からの強い噴出が認められる(24分17秒頃まで)。このほか VTR 画像では、ちぎれた薄片が舞いながら落下し(23分23秒頃まで)、電解セルタンクの電気ケーブル手前に落下物(径10センチ程度の金属)がみられ、画像右下床面上で一端が燃焼中の配管が這いずり(21分30秒頃まで)(付近に他の燃焼片らしきものあり)、他の黒色物(10センチ程度)が右下床面へ落下し、21分40秒頃まで転がる様子が観察された。

(9) 23分22秒頃から、24分まで酸素配管ヘッダ管付近などから白煙が勢いよく噴出した。この時点で、電解セルタンク上方の、循環水供給配管と排出配管の色が明らかに黄色に変化していた。

(10) 24分05秒から 24分14秒までにわたって、酸素配管の酸素放出ラインのフランジ付近上方に炎がちらちら見えた。

(11) 25分には酸素配管ヘッダ管付近から映像画面右向きに蒸気が認められるが、それ以外は治まったようである。

事故調査委員会では、異常現象を大きく、22分36秒に電解セル圧力が上昇しはじめてから 22分55秒頃に一旦 42MPa (安全弁の閉止圧力) まで低下するまでを「第一段階」、

それ以降に再び圧力が上昇しはじめて起こる一連の過程を「第二段階」と呼ぶことにした。電解セルの一部のチタン電極および他の構成部材の燃焼であったこと、及び生じた高圧は安全弁の開放によって一旦低下したこと、が第一段階の概要である。

5. 事故経過の推定

5. 1. 高圧高温の発生

第一段階において、電解セルの一部のチタン電極および他の構成部材は異常反応し、生じた高圧は安全弁の開放によって一旦低下した。循環水配管の水の流れにのって、電解セルから熱及び物質が流出した。

電解セルタンク ECT-1 への循環水入出力配管のいずれも高温による変色があった。このうち、電解セルから OST-1 へ水を送り返す配管 B1082 は、変色とともに全面塑性変形で管がふくれていた。その色の変化から外面の温度は最大 400℃程度であり、この温度による強度低下を考慮して、配管内圧は 114MPa（全面降伏）～176MPa（延性破壊）と推定された。VTR 画像の解析から、色の変化は 13 時 22 分 36 秒頃（電解セルの異常発生時）から始まっていたことがわかった。

一方、OST-1 から電解セルへ水を供給する配管 B1084 も同様に変色していたが、VTR 画像の解析から、色変化は B1082 より遅く酸素配管の破壊が起こった 13 時 23 分 18 秒すぎから急速に起こったことがわかった。すなわち配管 B1084 の温度上昇は酸素配管破裂の直後であった。これは、最初の異常発生時には常温の循環水の流れがあったが、酸素配管が破裂したことで ECT-1 から高温の水が逆流したためである。管の肥大は認められず、温度上昇が始まる前に、室温で内面が降伏した（全面降伏ではない）と考えられる。したがって、降伏時の配管内圧は 99MPa（内面降伏）から 152MPa（全面降伏）の間であったと推定された。

一方、電解セルタンクに発生した最大圧力は 130MPa（全面降伏）以下と推定された。したがって、2 本の配管と電解セルの変形状態から、第一段階において電解セル ECT-1 に生じた最高圧力は 120MPa 程度であったと推定された。電解セルに接続された循環水配管を通った流体の最高温度は 400℃以上であったと推定された。

第一段階の圧力上昇において、圧力計により記録された最高圧力は約 55MPa であった。しかし、測定計器の信号伝達には遅れがあり、急速な変化に対しては、入力に対して出力が実態を表していない。そこで圧力計を一次遅れの伝達関数で表して数値計算を行ったところ、電解セルの到達圧力は 91.5MPa と推定された。これは上述の配管の材料強度から推定した最高圧力と定性的に符合する。

セル内に存在した水素、酸素量からは、水素と酸素の反応、またはチタンと酸素の反応だけで上記の高温高圧の発生をもたらしたとは考えられず、チタンと水の反応が起こったと推定した。そこで、チタン・水・水素の系に対する断熱反応の計算を行った結果、電解セルを構成するチタンと水の反応が高温で継続すれば、上で推定された最高到達圧力が生じたと推定された。また、安全弁の開放を考慮した断熱過程の計算の結果は、圧力が一旦低下した状況と一致した。

一方、電解セルで用いられている固体高分子膜（ナフィオン）は 100℃以上の高温状態

で分解すると言われているので、分解してフッ素を発生したと考えられ、これがチタンと反応してフッ化チタンを生じたことが、加熱を促進した可能性も考えられる。さらに、フッ素ゴム、PEEK 材などについてもより高温で分解することが知られており、いずれもフッ化物を形成したと考えられる。

5. 2. 物質と熱の移動

事故後の電解セルの状態から、電解セルはほぼ全部が異常反応にかかわったと考えられ、第一段階での部分的な異常反応はさらに電解セル全体に波及した。そのために、ECT-1 内で一旦低下した圧力は再び上昇をはじめた。23 分 10 秒以降は、圧力が 45MPa に達して水素側、酸素側ともに安全弁が再び開いたと考えられる。酸素側の安全弁開放にともない、反応生成物などを含む水は、酸素分離タンクへの循環水配管を通じて再び酸素分離タンクと酸素配管へ流出した。

また、第一段階開始の直後に、差圧解消バイパス弁が開いた。このことで、電解セルタンクと酸素分離タンクは差圧解消ラインを通じて開通した状態となり、酸素分離タンクへの物質輸送は、循環水配管だけでなく、この差圧解消バイパス弁を通じても生じていた。水循環ポンプ P-1 は 22 分 56 秒に停止しているが、その後も、23 分 00 秒頃まで差圧解消バイパス弁を通じて水素を溶解した透過水が酸素分離タンクの酸素を溶解した水に混入した。

5. 3. 酸素配管の破裂

この状況の下で、23 分 18 秒に酸素配管の破裂が起った。このとき、水平配管に接続されていた圧力計 PIRA-01 の記録は、最大で 50MPa をわずかに上回る値を示していた。しかし、配管の変形状態からは実際にこれをはるかに超えた圧力が局所的に瞬間的に発生したことが考えられる。エア作動弁 AV-06 の本体は HHEG 室北東角付近、その蓋は HHEG 室北側土間に落下した。材料強度の計算から、蓋部にかかった圧力は 57MPa～86MPa と推定された。

配管の破裂を生じた原因として、①酸素内の過大圧発生、②配管の減肉（による強度低下）、③配管内部の燃焼、④配管外部の燃焼が考えられる。このうち、配管や構造物の変形状態や周囲の状況から④が酸素配管破裂の原因であった可能性は低いと考えられる。また、②の配管の減肉による強度低下については、③の内部燃焼があったとすればその結果として起こりえたと考えられ、実際、配管 P-7 は破断部の一端が燃焼して減肉した。しかし、これが P-7 の破断の直接的原因であったか、付随して起ったことであるかは不明である。このほかの配管は減肉していないため、②が支配的であった可能性はないと判断できる。

配管の破裂は、いずれも、配管が行き止まりになっている箇所の手前で生じており、そこには酸素が残留していた可能性がある。また、電解セルの異常反応により、配管系全体で圧力は 40MPa 以上に上昇したが、それだけでは破壊を生じた原因にはなりえない。破壊が主として過大圧によって起ったとすると、過大圧は局所的かつ瞬間的なものであり、ある箇所で発生した過大圧が管内を圧力波として伝わって他を破断させたと考えられる。最初の過大圧発生位置としては、損傷が集中している水平配管 C1116 と三分岐継手付近のいずれかの可能性が高いが、配管 C1186 の塑性変形が三分岐点側で著しかったことから、

後者の可能性がより高いと判断した。

この三分岐継手の酸素分離タンク側は、この配管系では最も細い呼び径 1/2 インチの SUS316 配管を使用している。酸素分離タンクからの流れは、この配管部で最も絞られ、そのため流速は他の配管に比べて高い。さらに AV-06 の開放にともなう一時的な流量増加によって流速の増大がありえた。第一段階のあと、酸素分離タンクから安全弁へつながる部分には水が充満し、下流の弁が閉じられていた P-7 などの配管には、第一段階開始前にあった酸素が残存していた。

配管 P-7 の一部は三分岐継手から離脱しドライレグ側も破断して、HHEG 室北東角付近の土間に落下した。落下した部分は三分岐継手側が延性破壊しており、他端は燃焼した。監視カメラの VTR 画像から P-7 は配管破壊時に燃焼し、すぐに落下したが、落下途中で HHEG 室壁面と衝突した跡の残留物から、落下後の燃焼物は配管自体のステンレス鋼 SUS316 ではなく、配管内面に付着していた可燃物であったと推定される。

したがって、電解セルで生じた異常によるセル破片、セル反応物ないしは水素が、循環水とともに酸素側配管に至り、一旦緩和した圧力のもとでセル破片、反応生成物などの異物、及び水素が配管内に残留し、その後の安全弁開放によってさらに飛入し、これが着火の原因となって配管内の酸素雰囲気中で急速に燃焼し、さらには配管の鋼が燃焼したと考えられる。

以上から、配管 P-7 内での内部燃焼が、三分岐点につながる配管の破壊の原因であった可能性が高い。この燃焼による過大圧力の波が配管内の水を伝わり、水平配管 C1116 での延性破壊（常温）と塑性変形を生じさせた。水平配管での配管の内圧は 163MPa（全面降伏）から 257MPa（延性破壊）の間と推定された。

一方、酸素通常放出系配管のフランジでは、フランジ面間に隙間が生じて面が燃焼した。ボルトを降伏させる内圧は 1773 MPa と推定され、これは配管を全面降伏させる内圧 163MPa よりはるかに高く、起こりえない。したがってボルトが降伏する前にフランジ間から火炎が噴出したと推定され、その原因として過大圧が加わったことによりフランジ面間に隙間が生じた可能性が高いと推定した。

配管の破裂によって、配管から反応生成物を含む高圧の水が噴出し、高圧の電解セルタンクから酸素分離タンクへ向かって物質が一気に移動をはじめた。このとき、電解セルへ水を供給する配管も逆流し、循環水の冷却器の温度が急上昇した。

5. 4. 電解セルの異常の原因

電解セルは、結果的にはほぼ全体的に反応した。電解セル以外で得られた知見を総合すると、電解セルは少なくとも 40 秒間燃焼しつづけたが、その発端は、セルの一部での反応の開始であったと考えられる。

電解セル内の異常反応の発端として、次が考えられる。

①チタン電極の反応

②水素と酸素の反応

①が生じた原因として、チタンの白金コーティングがなんらかの理由で（例えば白金コーティングを介しての酸素のチタンへの拡散による膨張、輸送時の振動による摩耗など）部分的に剥げ、酸素と高圧高温状態で触れることで自然発火した可能性が否定できない。

文献によれば、純粋チタンの常圧の酸素雰囲気下での自然発火の温度は高いが、圧力が増大すると発火温度が低下することが報告されている。したがって、高圧のセル内でチタン、とりわけ陽極のチタン焼結体に酸素が滞留し乾いた部分が露出した状態で温度上昇が生じれば自然発火が起りうるものと判断される。電解セルにおいて電気分解は完全に均一ではなく場所によってある程度の大小があり得るが、後述するような酸素の滞留があったとすれば、周囲に比べて温度が上昇し、酸素とチタン電極が触れる可能性がある。ただし、40MPa の水中におけるチタンの発火条件のデータが存在しないため定量的な判断は困難である。

チタンはフッ素とも反応する。3.4 節に記したように、固体高分子膜（ナフィオン）は100℃以上の高温状態で熱分解するが、高圧水中ではそれが促進され MEA からフッ素が放出され、それが水流に流されずに残留して部分的に濃度が上昇したとすると、チタンの電極と反応した可能性がある。これにより温度が上昇して MEA の一部が破損し、さらに酸化発熱反応に発展することが考えられる。

②が生じた原因としては、セルの構成部材である MEA、あるいはゴムシールが部分的に破損し、これを通じて酸素が陰極側（水素側）に流入し、酸素水素の混合気が反応したことが考えられる。構成部材の損傷が潜在的にあった場合、HHEG の運転中に損傷が発生拡大した場合、及びその両者である場合が考えられる。

チタンの反応、あるいは酸素の漏洩と水素との反応、の背景として、電解セルの次の状況を念頭におく必要がある。

（1）酸素気泡の滞留

40MPa 運転時の循環水中の酸素は飽和溶解状態にあり、セル内の水中に酸素気泡が、セル内の特定の位置に滞留した可能性がある。前日の試運転において、圧力降下時に循環水中の溶解酸素の解離による気液二相流と思われる現象が観測されているが、低圧時の気泡自体が残存して高圧になったのではなく、それらが気泡核となって残存したところに、電解を行ったために気泡核が成長したことが考えられる。気泡が滞留した原因としては、多孔質なチタンの給電体と網状のチタンメッシュの給電体において、複雑な形状のために淀み点があったことが考えられる。

（2）差圧の変動と増加

水電解の定常運転中には、電解セルの陽極陰極間にはつねに圧力差があり、電解セルへの循環水供給口と電解セルタンク内の水素との間の差圧が平均 40～50kPa 程度、振幅 20kPa で変動している。この変動は大きいものではないが、特に減圧時において溶解ガスが水から離脱して生じる気相の影響で、差が拡大する傾向があった。

一方、水循環ポンプ起動による電解セル圧力上昇に関する解析シミュレーションにより、電解セルにおける循環水供給排出での圧力低下が大きくなると 0.6MPa の圧力が電解セルに発生するとの結果が得られた。しかし、それだけ大きな圧力低下が実際に HHEG で生じた証拠はいまのところ得られておらず、圧力低下が大きくなければ、このシミュレーションが示す限りにおいて、0.6MPa までの圧力上昇の可能性は低い。

（3）固体高分子膜の欠陥

MEA に何らかの欠陥が存在した可能性はゼロではない。いわゆるピンホールと呼ばれるもの、あるいは白金めっきの前処理で行われる表面粗化による表面欠陥が存在していた

とすれば、それらが圧力変動の影響等によって拡大し、酸素漏洩の通路となりえる。事故で燃焼した膜にピンホールあるいは、表面欠陥の存在の有無は、調べる余地がないが、もし存在していたとすれば、酸素漏洩の可能性が増大する。

(4) 気泡の漏洩

電解セルにおいて、各セルの陽極は MEA の下側に配置されていた。一般的には、上側に配置されている例が多いようである。陽極が下側にあることの影響として、水電解で発生した酸素気泡が浮力により電極から離脱しにくいことが考えられる。もし離脱できずに拡大した気泡が、ピンホール等の MEA の欠陥の位置にたまたま存在したとすると、電極間の差圧によって、気泡は水素側に漏洩するはずである。40MPa の高圧下で、脱泡の起こりやすさと浮力の関係について、未だ十分な定量的知見はないが、脱泡への影響を否定する材料はない。

(5) その他

事故の前日までに事故の予兆があったかどうか、HHEG 記録データを中心に、検討したが、明確に事故に関連した予兆の証拠は得られなかった。

以上(1)から(5)と異常反応の原因との関連の有無については、引き続き検討中である。

現時点では、電解セルの異常反応の発端として、上にあげたいいくつかの事象の可能性の大小の判断材料が不足している。しかしながら、電解セル電極のチタンの大半が反応した原因は、40MPa の高圧下におけるチタン電極の一部の反応か、セル中の酸素と水素の混合気の反応のいずれかによって部分的な発熱が生じ、これにより周囲に存在するチタン、MEA、ゴム、水が連鎖的に反応したためと考えられる。酸素と水素の混合気が生じた原因として、陽極側の圧力が陰極側に対して常時、数十 kPa 高い状態で運転されており、陽極側の循環水中に存在した酸素気泡が MEA ないしはシール部のなんらかの欠陥を通して陰極側に漏洩した可能性が高い。MEA のピンホールを通して陰極側に移動した場合、酸素を生じる陽極が MEA の下側に配置されていることが漏洩を助けたことが考えられ、現在追加調査中である。

6. 管理運営に関する調査

九州大学工学研究院はこの事故を重く受け止め、これを契機に水素ステーションのみならず研究院全体の事故防止体制の一層の向上を目指している。このため、事故の技術的原因のみならず、その根底にある安全文化についても調査検討を行うこととした。本章は主に後者の安全管理上の問題を対象として検討した結果をまとめたものである。

6. 1. 調査方法

地域新生コンソーシアム研究開発事業に関わる諸記録、水素ステーションの届出書類、マニュアル、記録、過去の事故事例、安全に関わる学会の学会誌、一般企業の安全管理の実例などを調査するとともに、九州大学、及び関係機関にヒアリングないしアンケート調査を実施した。

6. 2. 調査結果

(1) 情報の共有について

HHEG は開発段階にある新技術であるが、一般に新技術の開発において企業秘密があることは当然のことである。水素ステーションのプロジェクトにおいては、HHEG の開発者から、他のコンソーシアム構成員に HHEG の仕組みや安全対策などについて情報が提供されたが、その潜在的危険性についての情報はその高度な技術専門性のためコンソーシアム構成員に必ずしも十分には伝わっていなかった。このような情報不足が事故につながることは度々指摘されているところであり、異なる企業で構成されるコンソーシアムが必然的に抱える問題である。共同研究においては企業秘密の扱い方が今後の課題であり、十分な技術情報の開示と議論の徹底、必要な措置の策定及び確実な実施、組織間の分担及び権限を明確にし、契約などに明記すべきであろう。

(2) プロジェクトの安全評価について

HHEG の開発・製作者は、想定外の原因によりセルの破損、爆発が起こった場合でも人的事故に至らないシステム安全設計を行っていた。しかし、さらに安全性を高めるために、九州大学は事前に本プロジェクトのリスクアセスメントを行うべきだった。

(3) 新規技術開発について

HHEG の開発・製作・運転関係者は技術的には種々の方策を実施していたが、技術的な問題はそれを超えたところにあった。高度な新規技術を要する装置は、研究施設内で要素部品、システム等の十分な安全検証を終え、段階を踏んで実設備とすることが必要である。

(4) 管理運営について

HHEG 以外の水素ステーション設備については、各社間の情報の共有は充分であり、議論の結果も反映された。企業主導で管理運営がなされたため、法的にも問題はなく、適正な運転、教育、人員配置が行われていた。なお、「保安技術管理者」等には大学教員がその任についており、他の業務を抱える状況では、実質的に十分な職務遂行が困難であったと思われる。専任の管理者に任せるなど改善を要する。また、水素ステーションの竣工は報道機関に公開したが、学内および周辺住民への説明を行っていない。このような点は改める必要がある。

(5) 事故時の対応について

本項目については反省すべき点が多々あった。試運転中とはいえ事故発生時の訓練は行っておくべきであった。このため九州大学から消防への通報を失し、危険区域への立入制限などを自主的に行えなかった。事故現場は混乱しているので、事故情報の一元化についても考慮すべきである。

(6) 九大の安全管理体制について

普通の企業では、職制のライン（上下関係、人事権あり）が安全管理のラインでもあり、機能している。大学にはこのラインが学科を越えては必ずしも明確ではなく、このため、組織の統率が不十分で、効果的な安全管理を困難にしている面も否定できない。このことを踏まえた上で、執行部トップの示している安全確保の重要性を末端まで伝達するしくみの構築、幹部による安全パトロール、業務手続きの整備、情報の共有などを推進する必要がある。以上、大学の特殊性を考慮にいれながら、安全管理体制の構築に取り組まなければならない。

7. 結論

7. 1. 事故の過程

これまでの調査によって、事故の過程は概ね次のように推定された。

(1) 事故は、13時22分36秒頃（ops2時刻、以下同じ）から電解セルの異常により高温高圧が発生して安全弁が作動した過程（第一段階）と、これに伴って発生した高温高圧と物質移動（配管を通じた水、ガス、異物の移動）によって最終的に13時23分18秒に酸素側配管で燃焼と破裂が起こった過程（第二段階）に分けて整理できる。

(2) 電解セルタンク内において、電解セルはほぼ全焼し、電極のチタンの大半は反応した。この反応開始の引き金となった直接的原因は、セル内のある一部における、40MPaの高圧下におけるチタン電極の発熱反応と、酸素と水素の混合気の発熱反応のいずれかであった可能性が高い。チタン電極の反応は、高圧酸素、フッ素、水との反応の可能性が考えられ、酸素と水素の混合気が生じた原因は、陽極側と陰極側の間の数十kPa程度の差圧によって、陽極側の循環水中に存在した酸素気泡がMEAないしはシール部のなんらかの欠陥を通して陰極側に漏洩したことが最も可能性が高い。MEAのピンホールを通して陰極側に移動した場合、酸素を生じる陽極がMEAの下側に配置されていることにより漏洩を助長したとも考えられる。

(3) 電解セルの一部で異常反応が開始した後、圧力の異常が検知され電流が停止されたが、電解を停止した後も反応は続いた。

(4) 電解セルの異常反応によって、高温、高圧が発生し、水素配管、酸素配管において安全弁が作動した。これにより圧力は一旦降下したが、電解セルの反応が続いたため再び系全体の圧力が上昇した。一方、電解セル異常が生じた直後から、反応生成物と電解セルの破壊で生じた破片、及び水素が循環水に運ばれ酸素分離タンクに達し、さらに安全弁に至る酸素配管にまで到達した。これらが酸素雰囲気中で燃焼することにより局所的な過大圧力を発生し、さらには圧力波が、先端が閉じた配管内に伝わり急激な圧縮を生じて局所的な過大圧力を発生し、酸素配管の延性破壊をもたらした。

(5) HHEGは電解セル内の差圧を一定範囲内に制御する機能をもつが、急激な圧力上昇を避けられなかったことにも今回の配管の破壊の原因の一端があった。循環水配管には圧力の解放機構がなく、水素ガスと酸素ガス配管の安全弁は圧力が降下したため一旦閉止したと推定され、その後も引き続いて電解セルの異常反応が継続したために、再度圧力上昇が起った。

(6) 配管破裂によって、循環水とともに電解セルの反応生成物が配管外に噴出した。電解セルで生じた生成物には、固体としてはチタンの化合物と炭化物、液体には腐食性のあるフッ化水素酸、スルホン酸イオンなどと、鉄などの高压容器の構成元素が含まれていた。

(7) 試運転を開始してから前日まで、及び事故当日に電解セルの異常反応が発生する直前まで、HHEGの異常現象は認められなかった。

しかし、以上の調査から、異常につながる可能性のあるいくつかの項目が考えられた。それらには、MEAやシール材料など材料に関連する事柄や、気液流れなど運転に関連する事柄が含まれるが、いずれも、40MPaの高圧下という条件における物質の振る舞いの理解のうえにたって究明されるべきものであり、今後さらに調査を進める必要がある。

7. 2. 管理運営について

管理運営に関する調査結果の要約は以下の通りである。

(1) 関係者間で十分な情報が共有されていなかった。これは、新技術の開発に内在する問題であり、このような情報不足が事故につながることは度々指摘されている。

(2) HHEG は人的事故に至らないようにシステム安全設計を行っていたが、安全性をさらに高めるために、九州大学は事前に本プロジェクトのリスクアセスメントを行うべきだった。

(3) HHEG の開発において、予測できなかった技術的問題が発生した。新規技術開発においては、十分な安全検証を行い、段階を踏んで実設備とすべきである。

(4) 水素ステーション設備の管理運営上の問題はほとんどなかった。これは企業主導で実施された結果である。一方、試運転開始にあたって、学内外への説明が不足していた。

(5) 災害時の対応について、試運転中とはいえ災害発生時の訓練を行っていなかった。このため消防への通報を失し、危険区域への立入制限などを自主的に行えなかった。

(6) 大学の安全管理体制は民間企業に比べて必ずしも十分とは言えず、大学の特殊性を考慮に入れて体制を構築していく必要がある。

8. 今後の課題

8. 1. HHEG と高圧水電解技術

事故調査委員会においては、事故発生原因について科学的・技術的観点からの解明を試みてきた。装置の分解調査と状況証拠の収集を安全を期して慎重に行うとともに、残留物の分析、運転記録データの分析、配管の損傷に関する理論的考察と実験、諸反応や状態の理論的推定と実験、予兆現象の検討を行ってきた。さらに、これら多岐にわたる検討結果をむすびつけ事故過程を推定した。これらによって、事故の過程をかなり理解できるようになったが、電解セル異常反応の発生原因を完全に特定するには至らなかった。本水素ステーション実証設備は、HHEG の試作機の成功に基づき、実証試験の実施をめざしていたが、文献情報がほとんどない高圧領域での電解セルの挙動や HHEG システム全体の動作について、解決すべき以下の研究課題があることが改めて認識された。

- (1) 作動圧力下での、セル構成部材（チタン、MEA、シールなど）の耐久性確保。
- (2) 作動圧力下での、セル構成部材の異常反応防止。
- (3) 作動圧力下での水、水素、酸素などの基礎物性の把握。
- (4) 作動圧力下での局所的状態変動が異常事態に至らない電解セルの設計。
- (5) 作動圧力下での局所的異常現象を回避するための HHEG システムの設計。
- (6) 異常な圧力上昇を防止する HHEG システムの設計。
- (7) 高圧水電解装置の信頼性と安全性の評価方法確立。

ただし、上記の作動圧力とは、主として高圧力 40MPa をさすが、減圧の過程による影響も考慮すべきことから、作動圧力と記した。

一方、研究開発体制としては、要素技術とシステム開発のより有効な連携が極めて重要であることが、今回の事故のもうひとつの大事な教訓である。

さらに、今回は開発中の実証試験であったとはいえ、予測していなかった現象が生じた

ことから、上記研究課題の成果を得たのちに HHEG システムを再構築し試験を行うためには、設備の周囲との離隔や事故防止のための計測記録及び制御を十分に施し、適切に管理できる体制がなければいけない。

8. 2. 今後の調査活動

ここまでの調査をふまえ、今後は次の点を中心課題として、可能な限り調査を継続して行う必要がある。

- (1) 電解セル内の水と気体の流動状態とセル構造の関係に関する解析と実験。
- (2) HHEG 試作機 (α 機) の調査により、構成部材の不具合の有無の確認。
- (3) 40MPa の高圧下での構成部材の挙動の調査。
- (4) HHEG の制御動作に関わる熱流動の変動の解析ないし実験。

さらに長期的には、8.1 節で挙げた項目に関する基礎研究の実施が必要である。

8. 3. 管理運営に関する今後の課題

管理運営については、以下について取り組んでいく必要がある。

- (1) 共同研究における企業秘密の扱い方が課題である。安全第一で臨み、十分な技術情報の開示と議論を徹底、必要な措置を実施、組織間の分担及び権限を明確にする。
- (2) 大学において、プロジェクトのリスクアセスメントを行う。
- (3) 潜在的危険性のある新規装置の開発においては、要素部品、システム等の十分な安全検証を終えて、段階を踏んで実設備とする。
- (4) 専任の保安技術管理者を置くなど職務に専念できる環境を整備する。また、学内外へ事前に説明を行う。
- (5) 災害時に適切に対応できるよう、災害情報の一元化を図る。その一環として、本事故後、伊都キャンパスに緊急通報システムが設置された。
- (6) 大学の特殊性を考慮にいれて安全管理体制を構築する。

以上、技術的には、HHEG 及び高圧水電解技術の信頼性確立をめざして、起こりうるすべての現象に対応できる基礎技術の確立が必須であるとした。また、管理運営の面では、情報共有と安全管理についての抜本的な改善が必要であるとした。

本結論、および今後の研究が、関連する水素利用機械の信頼性と安全性確立のための一助となることを切に望む。

(追記) HHEG 試作原型機事故原因に関する事故調査委員会と外部評価委員会の見解

HHEG 試作原型機 (p 機) の事故は九州大学水素ステーションの実証機の事故と異なるが、次のように類似点を見いだすことができる。すなわち、酸素配管側で燃焼が起こり配管が破裂した点と、電解セルが燃焼した点において、両事故には共通点がある。また、ひとたび異常を生じたときに電解セルの燃焼を停止できなかった点においても同じである。

実証機の事故調査において明らかになったことから遡って考え、p 機に関する残存のデータを再検討すると、以下のようにも推定できる。p 機の事故報告においては、混合気の生成によって燃焼が起こり、これが電解セルの燃焼の原因になったと結論づけられたが、電解セルにおいて先に燃焼 (触媒作用による混合気の燃焼、あるいはチタン電極と酸素との燃焼) が起こった可能性もある。しかし、今回の実証機の事故調査においてと同様に、セル材料の発火条件などの判断材料が不足しており、推測の域をでない。

以上を総合し、HHEG 方式に限らず同様な条件で機械が設計される際に、本報告書で得られた知見が事故の未然防止に役立つことを切に期待する。

表1 事故調査委員会名簿（平成19年3月末現在）

機 関	部 署	氏 名
九州大学	機械科学部門	杉村丈一（委員長）
	機械科学部門	村上 敬宜
	機械科学部門	松岡 三郎
	資源システム部門	井上 雅弘
	機械科学部門	高田 保之
	応用化学部門	石原 達己
	知能機械システム部門	山本 元司
	知能機械システム部門	岡田 伸廣
	機械科学部門	北川 敏明
	機械科学部門	佐々木 一成
	機械科学部門	伊藤 衡平
	機械科学部門	河野 正道
	機械科学部門	中原 真也
	材料工学部門	増田 正孝
	材料工学部門	齊藤 敬高
	機械科学部門	渡部 正夫
九州電力(株)	総合研究所 新エネルギーグループ	横山 健一
	総合研究所 新エネルギーグループ	永田 吉憲
	事業開発部 事業開発第1グループ	岩崎 友晴
三菱商事(株)	エネルギー事業グループ	原田 宙幸
	エネルギー事業グループ	松本 雄一
(株)キューキ	営業技術本部 営業企画部	中島 健次
	営業技術本部 発電・エネルギー部	池田 祥宏
福岡県産業・科学 技術振興財団	産学官連携・研究開発グループ	清水 宏昭
日曹エンジニアリ ング(株)	技術研究所	高井 義明
	環境・エネルギー事業部	宮越 栄一
日立造船(株)	事業・製品開発センター 企画・開発部	前畑 英彦
	事業・製品開発センター 企画・開発部	佐々木 加津也
	事業・製品開発センター 企画・開発部	田中 亜土
(独)産業技術総合 研究所	爆発安全研究センター 気相爆発研究チーム	堀口 貞茲
オブザーバー		
大陽日酸(株)	技術本部水素プロジェクト部	片岡 稔治

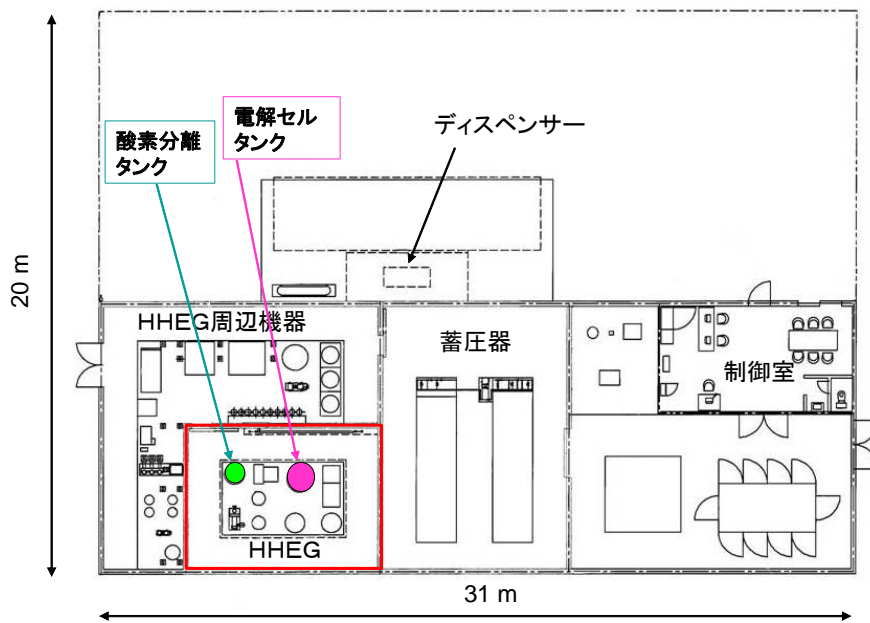


図1 水素ステーションの構成 (図の上が北、下が南)

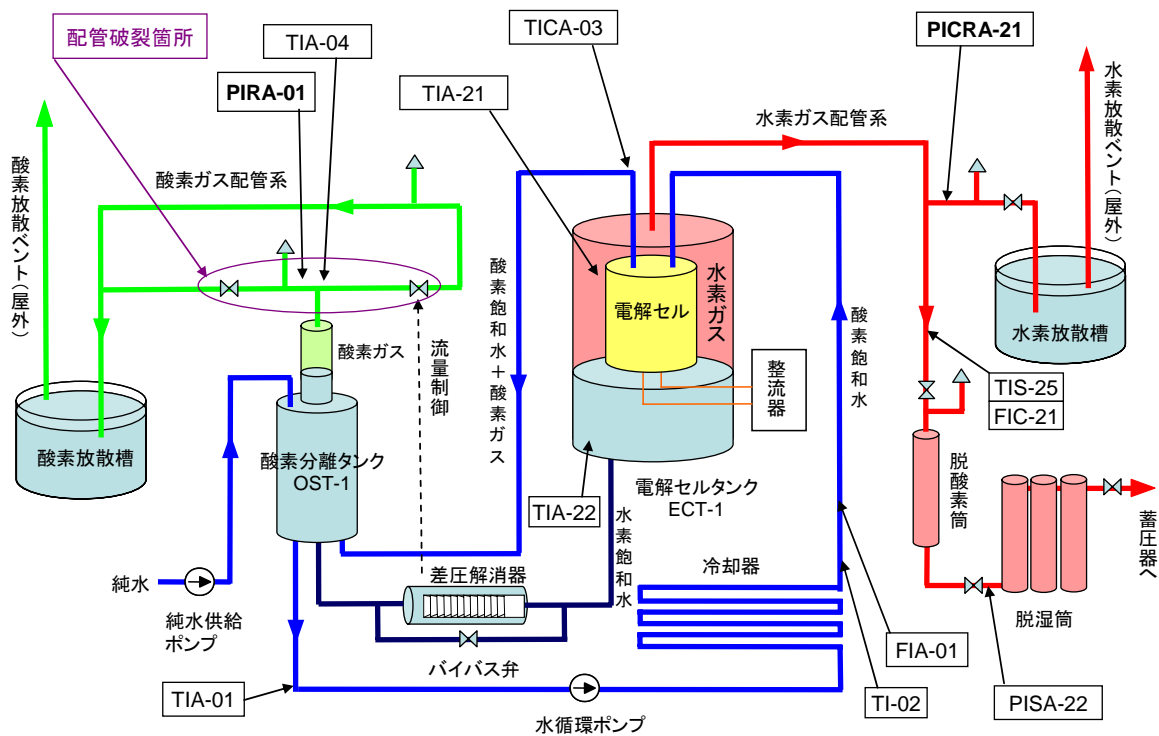


図2 HHEGの概要及び温度と圧力の測定箇所

(赤：水素ガス配管、緑：酸素ガス配管、青：水循環配管、紺：差圧検出用配管、
 ⊗：自動弁、△：安全弁)

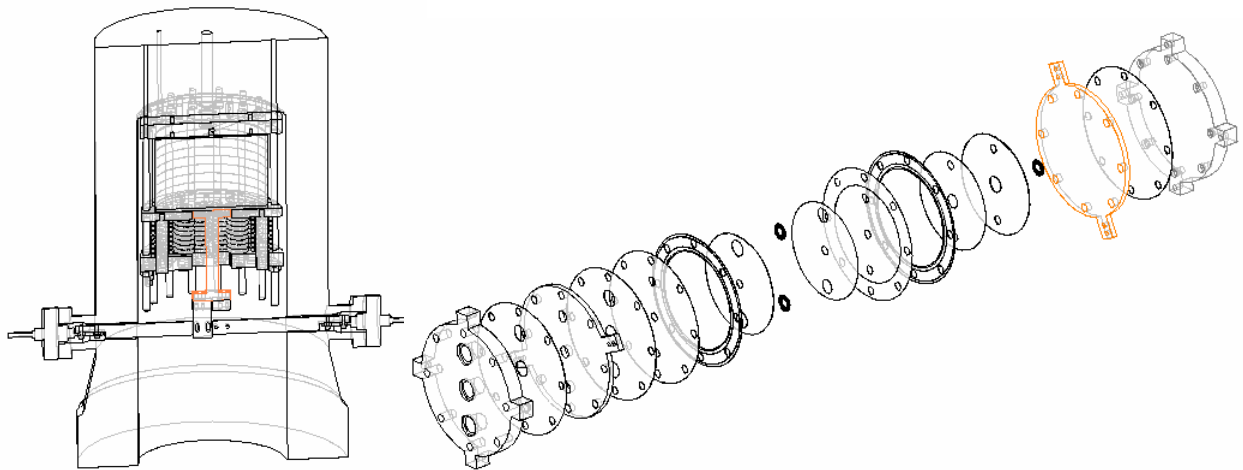


図3 HHEG 電解セルの構造 (提供：日立造船株)

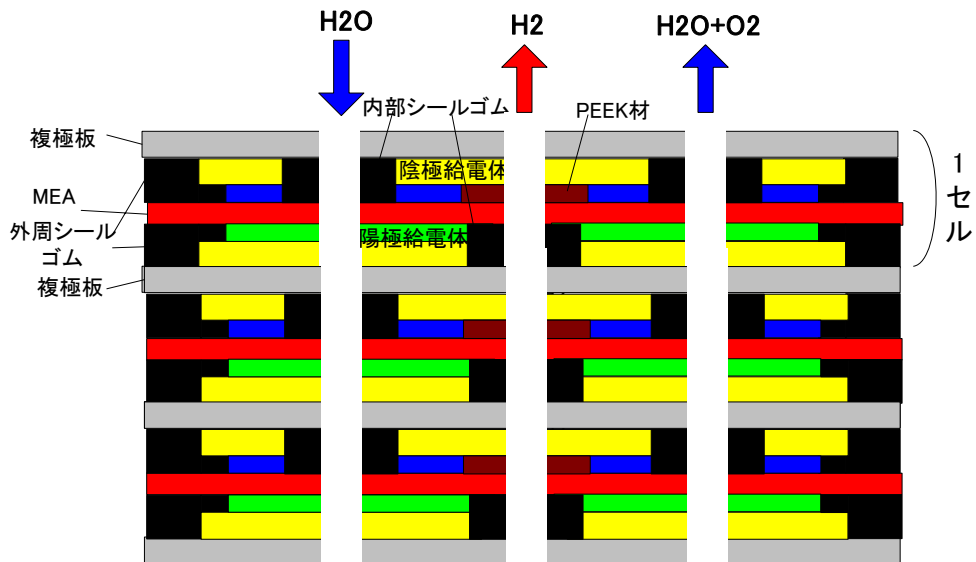


図4 電解セルのセル構造 (提供：日立造船株)

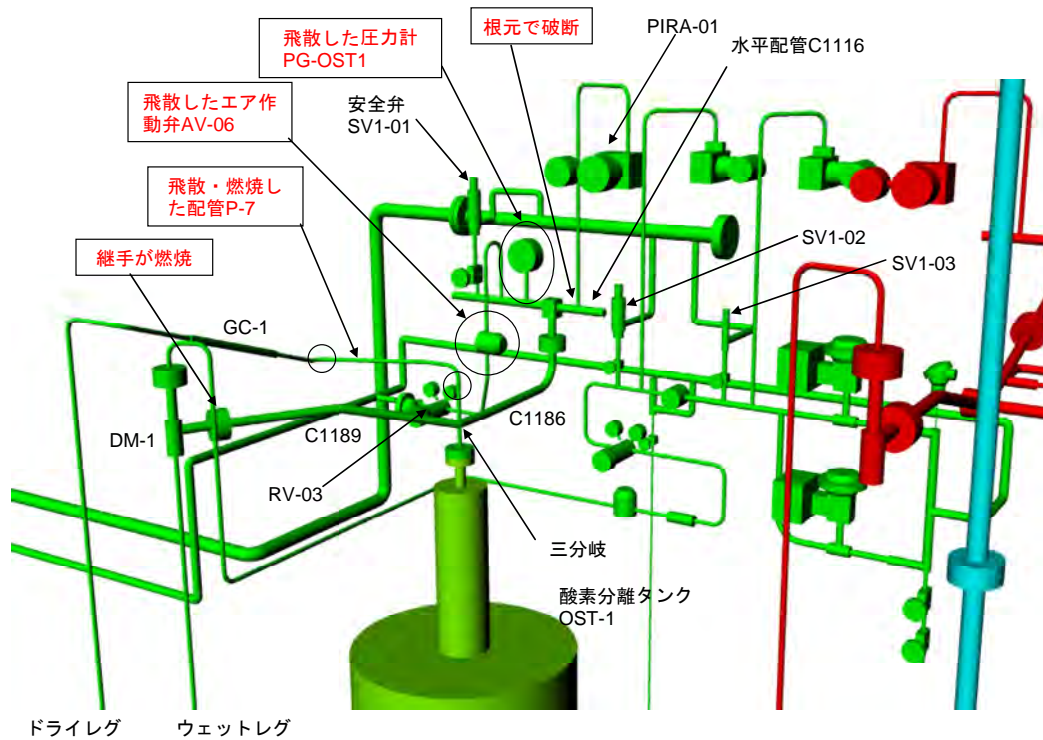


図5 酸素配管系（緑色が酸素配管系、赤は水素、水色は水）

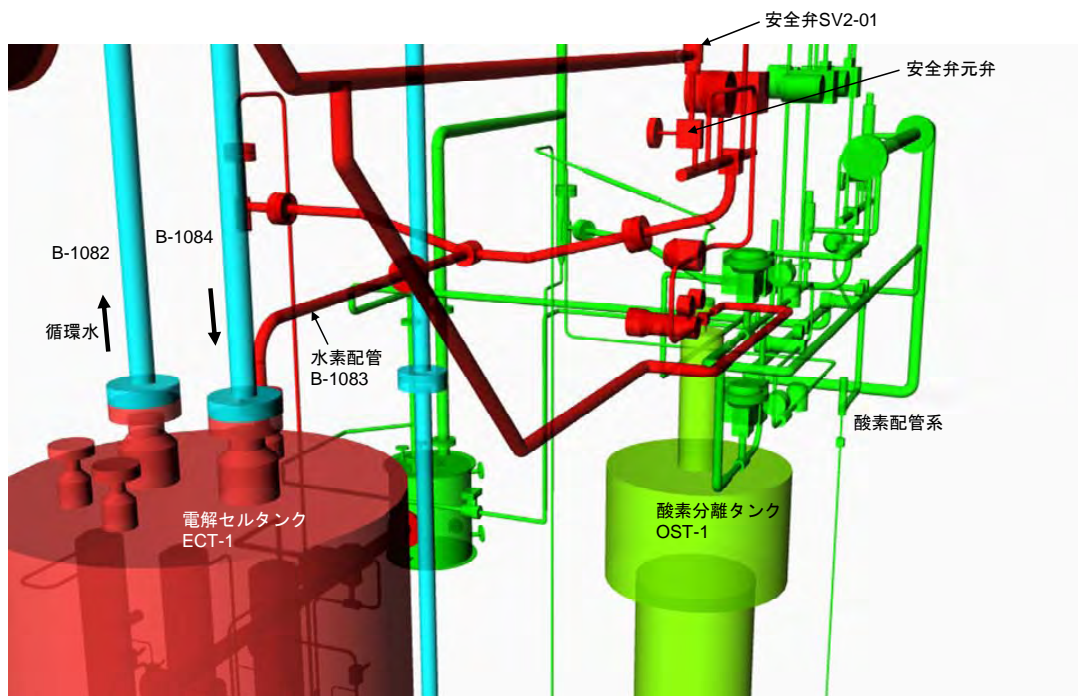


図6 電解セルタンクと循環水配管、水素配管



図7 電解セルの完成状態（左）と今回の破損状態（右）
（電解セルタンク内に取り付けられた状態では上下が逆になる）

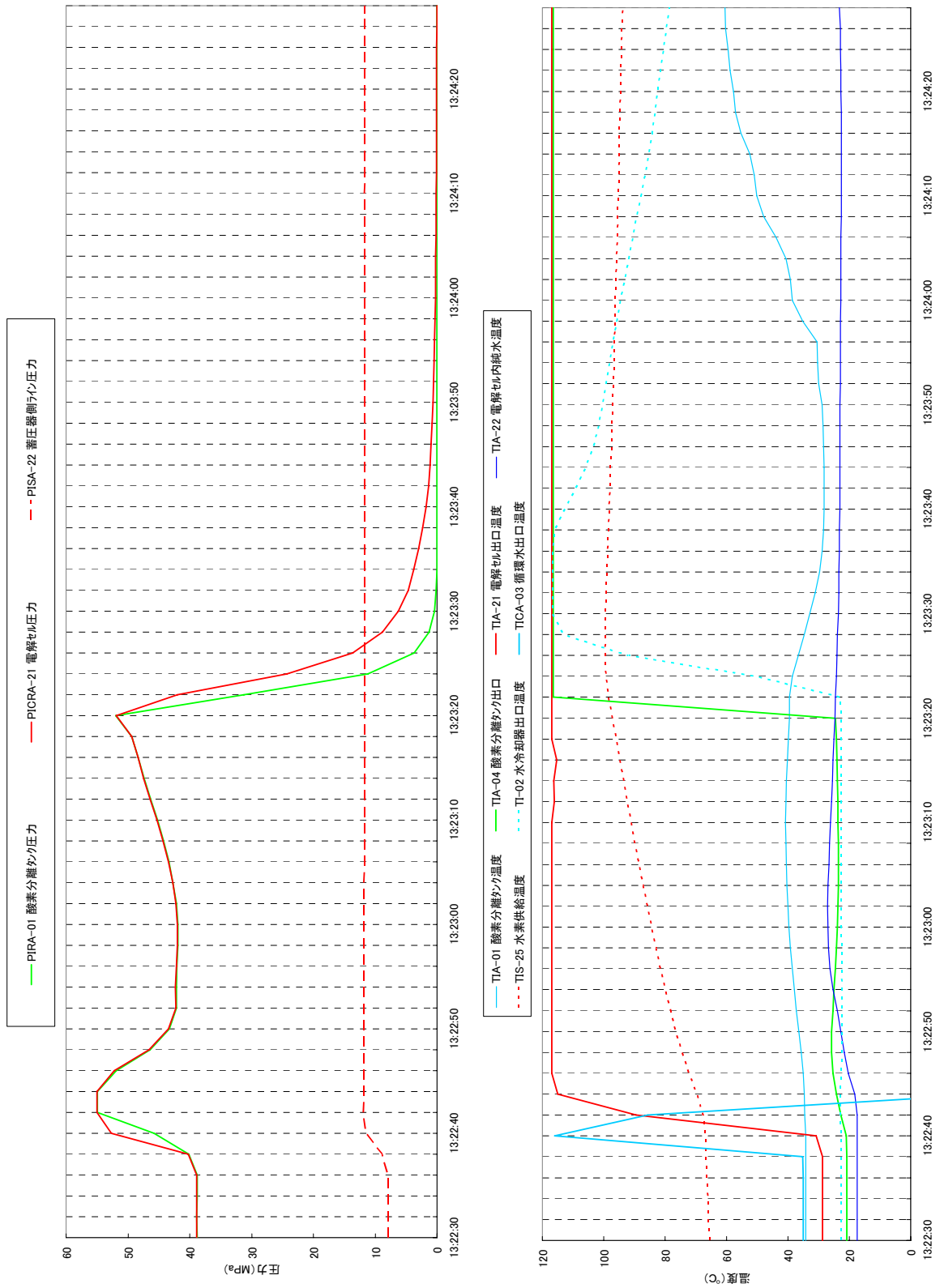


図8 HHEGの圧力と温度のデータ

