高圧ガス事故概要報告

整理番号 2005-415	事故名称 水素ステーション実証試験設備の爆発事故		
事故発生日時 2005-12-7　13 時 22 分	事故発生場所 九州大学伊都キャンパス（福岡市西区）		
施設名称 高圧縮水素エネルギー発生装置（HHEG）	機器名 水電解装置、酸素分離タンク出口側配管	主な材料 SUS304TP SUS316TP	概略の寸法 φ27.2×t5.5 φ12.7×t2.5
高圧ガス名 水素ガス、酸素ガス	処理量 1,080m^3/日（標準状態）	常用圧力 40MPa	常用温度 35℃

被害状況

水素ステーション実証試験設備の高圧水素を発生させる高圧縮水素エネルギー発生装置（HHEG）内で高温、高圧状態となり、安全弁が作動し、水素ガス、酸素ガスが噴出した。その後、酸素分離タンク出口側の配管が燃焼し、フッ化水素酸などを含む水とガスが噴出した（人的被害なし）。

事故概要

① 九州大学は、水素燃料電池自動車などに高圧水素を供給するため、水素ステーション実証試験設備を建設し、11 月 15 日から試運転を開始した。
② 11 月 24 日　水素ステーションの中核となる HHEG の試運転において、常用圧力 40MPa の水素が発生することを確認した。
③ 12 月 7 日　9：25　蓄圧器へ初めて水素を供給するため、HHEG の試運転を開始した。
④ 11：14　順調に昇圧し、水素圧力は常用圧力の 40MPa で保持した。
⑤ 12：43　蓄圧器に対して、水素の供給テストを開始した。圧力約 39MPa で安定運転状態であった。
⑥ 13：22　突然、安全弁が作動して水素ガス、酸素ガスが放散槽を経由して放散ベントから噴出した。
⑦ 差圧解消センサーが差圧異常を検知し、差圧解消バイパス弁を開、電解セルの電流停止、緊急放出、緊急降圧、水素供給停止動作に入った。
⑧ 安全弁が作動したので、圧力が約 43MPa まで一旦低下したが、その後ふたたび徐々に上昇した
⑨ 安全弁作動から約 40 秒後、酸素分離タンク出口側の高圧酸素配管が破断するとともに、一部が燃焼した。ほぼ同時に閃光を確認した。
⑩ 圧力計、配管、バルブ等が破壊して HHEG 室内に飛散した。
⑪ 破損箇所と酸素放出配管から反応生成物を含む水とガスが噴出し、白煙が生じた。
⑫ 飛散した水には、チタンの化合物、炭化物、フッ化水素酸、スルホン酸イオン、鉄などが含まれており、その飛沫が水素ステーション外部に駐車中の 5 台の自動車の窓ガラス、ボンネットに到達して微少腐食痕を発生させた。この事故による人的被害はなかった。

事故原因

① HHEG の電解セルタンクが高温、高圧（最終的には 400℃以上、120MPa 程度、いずれも推定値）となった原因は、電解セルタンク内部に組み込まれた電解セルの中で異常反応が発生したためである。
② 電解セルはほぼ破壊され、チタン、MEA（Membrane Electrode Assembly、膜電極接合体）、シールゴムが反応（燃焼）した。
③ 電解セルの異常反応により発生した物質が、循環水とともに酸素分離タンクへ移動したため、酸素側配管の一部で燃焼し、数ヶ所が破裂した。

④　酸素側配管に残存していた酸素と、電解セルの異常反応で生じた物質および水素が配管内で急速に燃焼した。これにより、配管も燃焼し、過大圧力が発生して配管内を伝わり、延性破壊と塑性変形を発生させた。このときの内圧は163MPa から 257MPa の間と推定された。

⑤　電解セルは少なくとも 40 秒間異常反応が継続した。最初は局所的に反応が開始して、徐々に拡大したものと推定された。

⑥　異常反応の発端は、40MPa の高圧下におけるチタン電極の一部が反応したか、電解セル中の酸素と水素の混合気が反応したか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推定された。

⑴ チタン電極の反応：チタンの白金コーティングがなんらかの理由で部分的に剥げ、酸素と高圧高温状態で触れることで自然発火した。

⑵ 水素と酸素の反応：セルの構成部材である MEA、またはゴムシールが部分的に破損し、酸素が水素側（陰極側）に流入し、反応した。

⑦　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って陰極側に漏えいした可能性が高い。

⑧　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で漏えいを助けたことが考えられるが、九州大学では追加調査を行って確認することとしている。

⑨　この装置では、電解セルの保護を優先し、高圧の水素、酸素および水の系が差圧解消器を介して、微妙な圧力バランスを保持する構造となっており、系内は同圧という発想から、安全弁は、電解セルタンク出口側の水素配管と酸素分離タンク出口側の酸素配管にそれぞれ一基、設置されていた。異常時には、圧力バランスが崩れるとともに、想定していなかった水の混入により放出量が制限されたため、安全弁の吹き出し能力を発揮できなかった。

再発防止対策

①　九州大学では、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ことなどから、高圧縮水素エネルギー発生装置（HHEG）の運転継続を断念した。今後は、高圧水素の供給には既存技術を利用し、水素ステーションの建設を継続することとなった。

②　本水素ステーション実証施設は、HHEG の試作機の成功に基づき、実証運転をめざして建設されたが、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、安全性について、解決すべき次の研究課題がある。これらは、作動圧力とともに減圧の過程による影響も考慮しなければならない

⑴ 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。
⑵ 作動圧力下での、セル構成部材の異常反応防止。
⑶ 作動圧力下での水、水素、酸素などの基礎物性の把握。
⑷ 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。
⑸ 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。
⑹ 異常な圧力上昇を防止する HHEG システムの設計。
⑺ HHEG の信頼性と安全性の評価方法確立。

③　予測していなかった現象が生じたことから、上記課題の成果を得たとしても、HHEG システムを再構築して運転を行うためには、リスクアセスメントの実施、設備と周囲との離隔、事故防止のための計測、制御技術を確立するとともに、

HHEG システムを適切に管理運営できる体制を構築する必要がある。

④ 事故当時、保安管理組織として、保安統括者、保安技術管理者などは大学教員がその任についていたが、専任ではなく、法に基づく実質的な職務遂行が困難であったと思われるので、運転再開に当たって、実効性のある保安管理組織を再構築する必要がある。

教訓

① 新機軸の装置開発では、要素技術とシステム開発の総合的な連携が極めて重要である。プロセス、装置、配管、計装施工など、エンジニアリングとして総合的な連携が欠ければ不安全となり、生産、機能優先では安全が疎かになる。安全･安心を追究したプロジェクトを推進する必要がある。

② このプロジェクトは、コンソーシアムを組んだ九州大学と企業が推進主体となっているが、安全のための一貫したエンジニアリングが不足していたと思われる。電解セル、圧力容器、配管、蓄圧器、充てんシステムが別々のメーカに発注、製作されているが、システム全体の安全を検討する責任所在をはっきりさせるべきである。

③ 開発者側は、当初、事故調査委員会において、過去の事故を積極的には説明していなかった。試作段階でのトラブル情報の提供など、説明責任を果たさなければならない。さらに事故当初、大学側も水素漏えいと爆発の事実の確認に時間がかかり公表が遅れた。その後、マスコミ、地域住民へ公表したが、緊急時の情報公開のあり方を日頃から検討すべきである

④ さらに、原型試作機で発生した事故調査が必ずしも十分ではなく、その経験が根本的に生かされず、類似点の多い事故が九州大学で繰り返された。事故の調査では、確実に原因究明を行わなければならない。

⑤ 運転中、電解セルには差圧が発生するが、電解セルの破損対策を優先し、差圧解消器で差圧を発生させない構造とした。系内の圧力バランスが崩れた場合、電解セルに差圧が発生するという前提で設計していなかった。循環水ラインには、圧力開放機構がなく、緊急脱圧が考慮されていなかった。万が一の異常状態でも安全を確保するシステム設計を行うべきである。

⑥ 電解セルでは、発生した酸素のシール部分にゴム（フッ素系）を使用していた。シールゴムのブリスター（blister）、溶存気体の沸騰、電解膜の損傷の発生など異常現象を引き起こす可能性を事前確認するため、リスクアセスメントなどを行うべきであった。

⑦ 新システムを使用する者は、システムの安全性に関して理解不足、情報不足があってはならない。この事例では、電解セルがブラックボックスであったため、高圧状態下（40MPa）での電解セルの挙動、構成部材の耐久性、安全性の確認が不充分であった。また、高圧状態とともに減圧過程（緊急脱圧など）での安全性も確保すべきである。

⑧ 開発者側と九州大学を含め他のコンソーシアム構成員との間で情報が十分に共有されていなかった。新技術開発に内在する情報共有、非公開情報の取り扱い、責任体制などに齟齬があれば事故につながりかねない。コンソーシアム、共同研究などでは、特に安全情報の共有は必要不可欠である。

⑨ 大学、研究機関の安全確保体制は、その特殊性が故、体制整備が不充分な場合がある。実効性のある保安管理体制を確立しなければならない。危険が顕在化している特殊な研究ではなおさらである。

⑩ 大学での高圧ガスの製造、貯蔵、消費に関する保安管理組織は、研究プロジェクトを越え、学科を越えると安全管理のラインが不明確で機能しないことが懸念される。大学（研究機関を含む）においても、トップから現場の研究者･補

助者まで、首尾一貫した保安管理組織･体制を構築すべきである。

⑪ 新規事業（特に先進技術利用）を立ち上げるに当たって、目的、安全性、実施体制、緊急時の広報、リスクなど、学内外へ十分な説明が不可欠である。それによって、当事者間でも情報共有と理解促進が図られることとなる。

⑫ 異常状態での緊急連絡、避難、広報を適確に行うため、マニュアルを整備し、運転開始前の早い段階で異常措置訓練を行うべきである。

事故調査委員会

・外部評価委員会：産総研、KHK、消防研、九工大、早大、佐賀大等で構成。平成18年2月28日から平成19年3月まで8回開催。

・学内の調査委員会：コンソーシアム構成メンバー、関係エンジニアリング会社、九大教員（主として材料、熱流体、燃焼、燃料電池などの専門家）で構成。平成 17年12月8日から平成19年3月まで17回開催。

・九州大学水素ステーション事故調査報告書　平成19年3月30日（要約版のURL http://www.kyushu-u.ac.jp/news/hydrogen/hydrogensummary0330.pdf）

備考

①HHEG試作原型機（p機）の事故

HHEG 試作原型機（p機）は、三菱商事㈱、日曹エンジニアリング㈱によって開発された。平成15年6月完成、水素発生能力　35MPa、2.5m^3/h（標準状態）。

構造は、電解セルタンクの底部に電解セルを据付け、陰極側はタンクのガス空間に開放しており、差圧解消器は、円筒ピストン式であった。

試運転中のところ、平成15年8月28日、ＨＨＥＧ運転停止中の深夜に爆発事故が発生した。

HHEG 停止時に、循環水のドレン弁が微開であったため漏水し、酸素分離タンクと電解セルタンクとの間の水が減少した。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、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と報告された。

破損状況は、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。

事故後の対策として、電解セルタンク内の保有水量を増加（タンク形状を変更）。

漏えい防止装置および漏えい検知装置の設置。

電解セルをタンク上部に据付け（循環水が上部から出入りするよう変更）。

などの水素と酸素の混合防止対策を改善して、HHEG試作機（α機）へ反映。

･本事故との類似点

1）酸素側配管で燃焼が起こり、配管が破裂した。2）電解セルが燃焼した。3）ひとたび異常が発生したときに電解セルの燃焼を停止できなかった。

行政への事故報告では、酸素分離タンク内で爆発燃焼が起きて、電解セルの燃焼が引き起こされたとされているが、本事故と同様に電解セルが先に燃焼した可能性が高いと思われる。

②HHEG試作機（α機）の事故

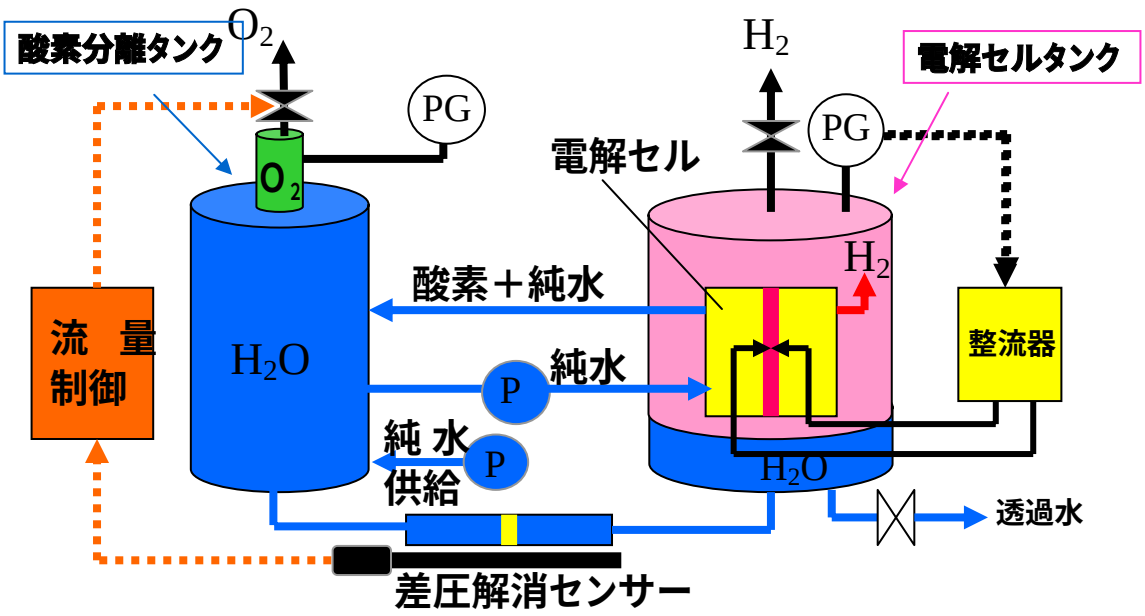
平成16年2月完成。水素発生能力　35MPa、2.5m^3/h（標準状態）。

平成16年7月21日　差圧異常のため電解セルが破損する。

流量制御方法に改善を加えて、同年11月に運転が再開された。この技術を基に九州大学向けのHHEG実証機が製作されたが、試運転中、平成17年12月に本事故が発生した。

写真･図面

写真１　事故直後の水素ステーション（南側）



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。閉じた電解セルタンク内で電気分解を行うことで、ガスの圧力は上昇し、常用圧力（40MPa）で、水素ガスを外部に取り出す。

図１　高圧縮水素エネルギー発生装置（HHEG）の概要

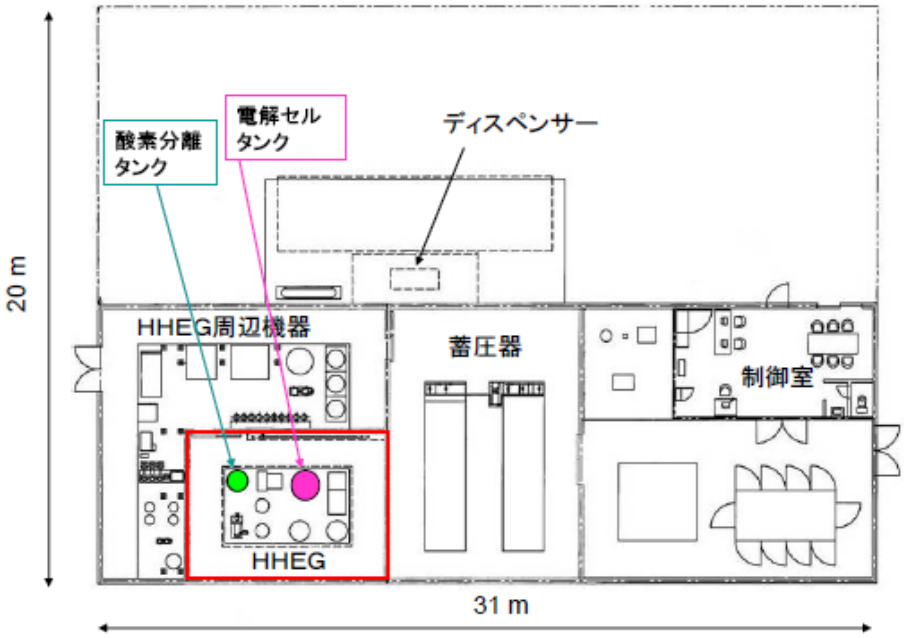


図 2 水素ステーションの構成 (図の上が北)

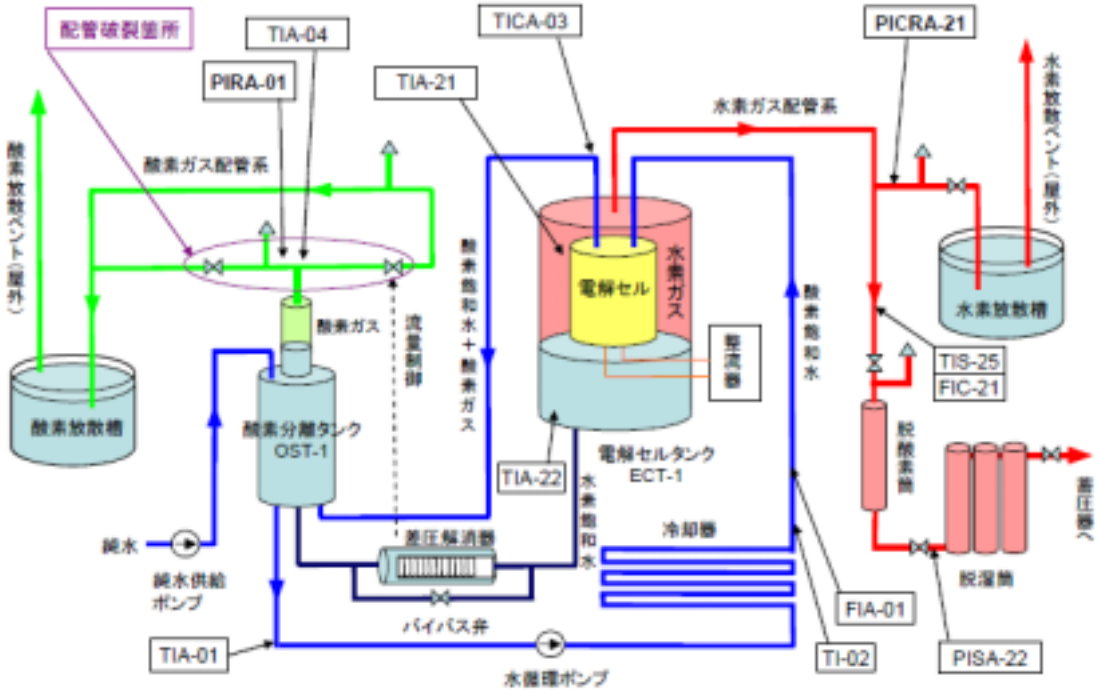
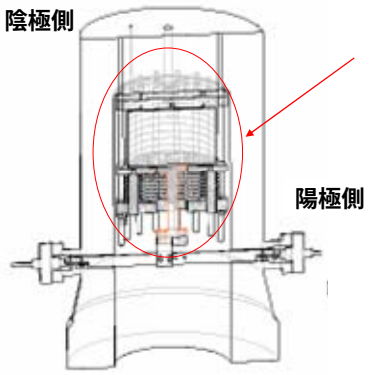
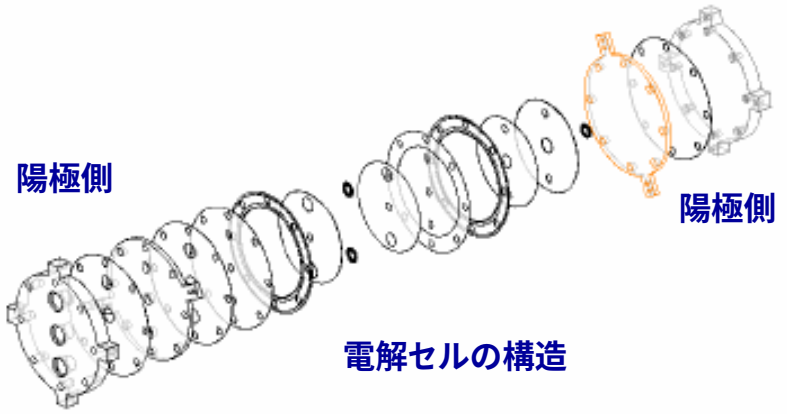


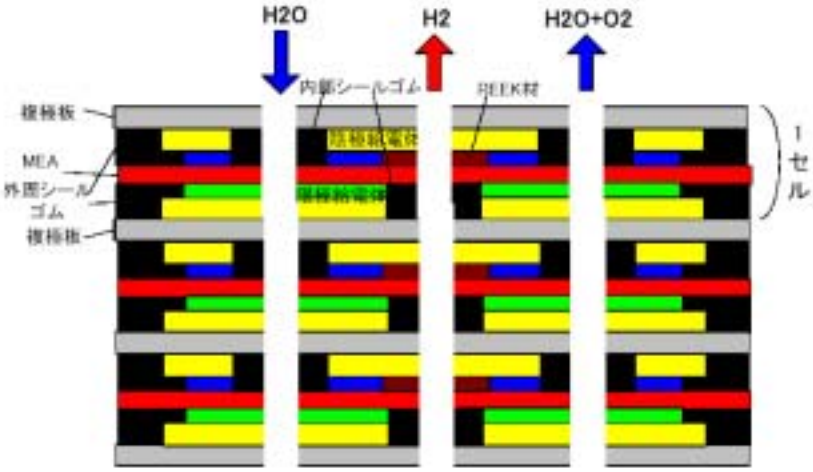
図 3 HHEG のフロー概要 (赤:水素ガス配管、緑:酸素ガス配管、青:水循環配管、紺:差圧検出用配管、 ⋈ :自動弁、△:安全弁)



タンク本体 SUS316L Di530×t148 約0.3m³
電解セルスタック (80セル)
セル面積 750cm²/1枚
定格直流電流 1200A
水素発生能力 30m³/h (標準状態)

図 4 電解セルタンクと電解セルスタック





・複極板
　導電性金属板
・陰極給電体
　導電性チタンメッシュ板+カーボンシート（水素と透過水の流路）
・MEA（Membrane Electrode Assembly）
　膜電極接合体：固体高分子のイオン交換膜（デュポン社製ナフィオン117）の両面に白金電極をメッキしたもの
・陽極給電体
　　導電性チタンメッシュ板+　チタン焼結体（水と酸素の流路）
・シールゴム、PEEK材のリングで構成

図 5　電解セルの構造

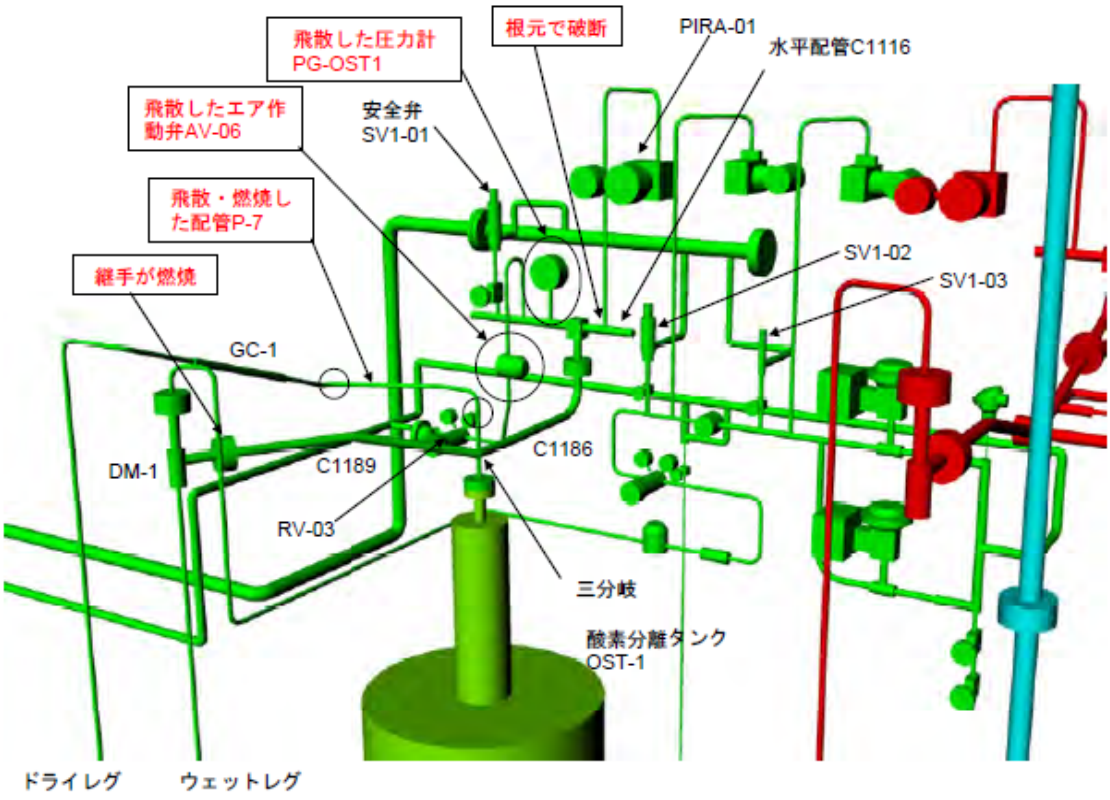


図 6 酸素配管系 (緑色が酸素配管系、赤は水素、水色は水)

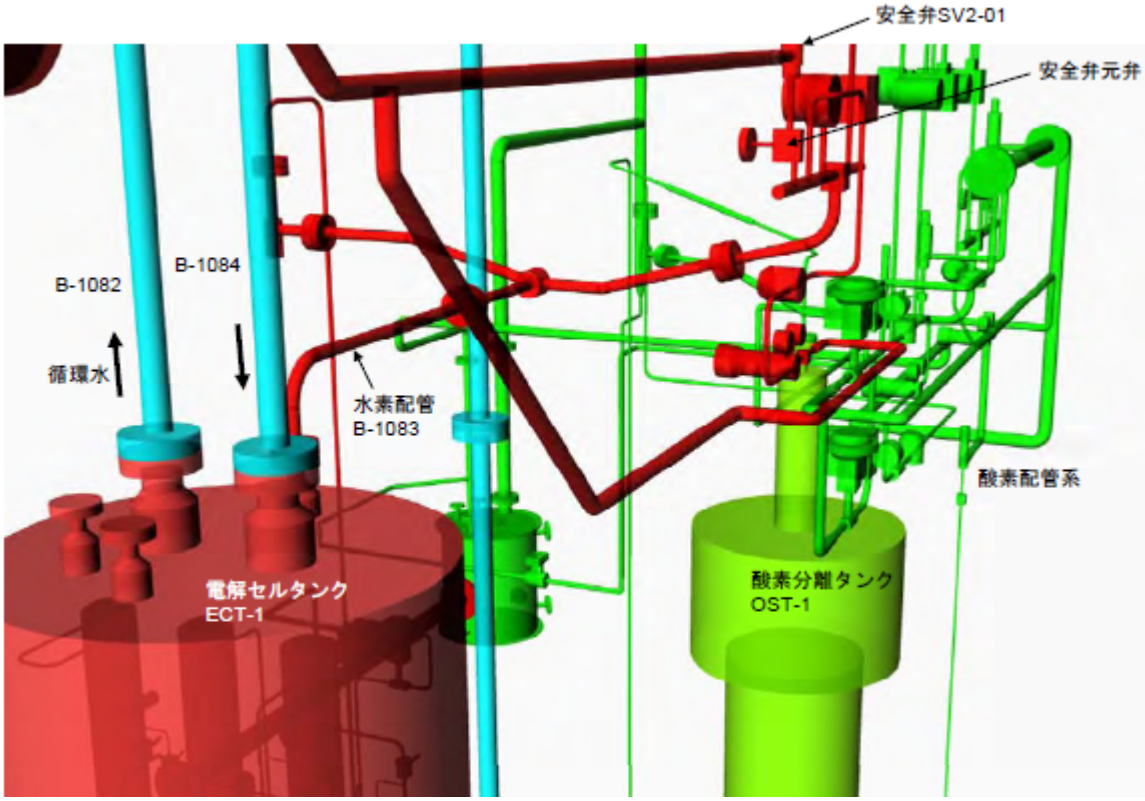


図 7 電解セルタンクと循環水配管、水素配管

写真 2 電解セルスタックの完成品（左）と事故後の破損状況（右）
（実際の取り付け状態は、写真の上下方向が逆となる。）

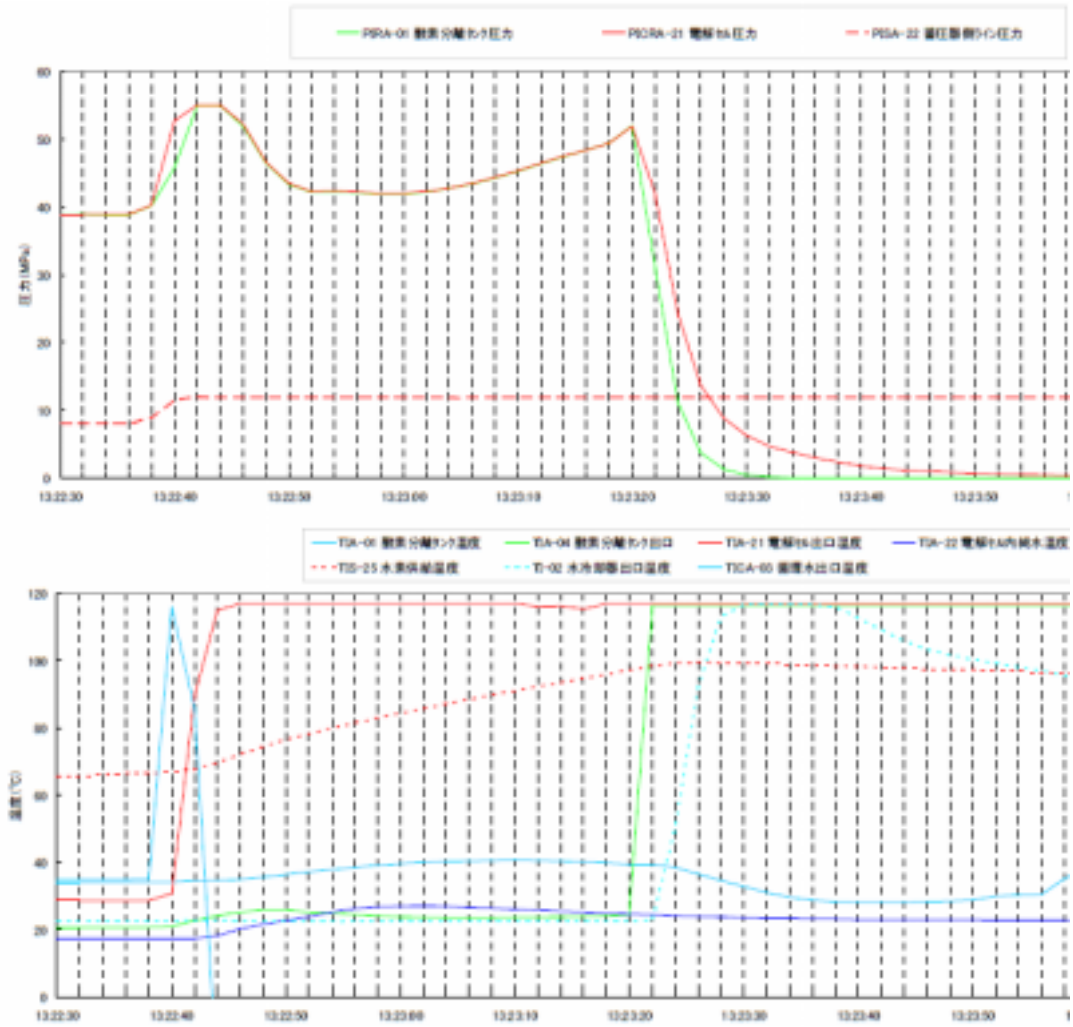


図 8 圧力と温度の推移（22 分 38 秒圧力上昇、23 分 18 秒酸素配管から閃光）

完成時
（断熱材未装着）

事故後

写真 3　酸素出口配管の状況

写真 4　HHEG 装置室内と周辺機器室の状況

写真 5　飛散した圧力計（ブルドン管破裂）とφ12.7 配管（P-7、外径拡大、燃焼痕あり）

写真 6　水平配管（C1116、20A）の圧力計取り付け部の状況

写真 7　水平配管の端部（膨らんでいる）

写真 8　酸素放散槽のフタ板の状況（膨らんでいる）