水素等可燃性ガスの爆発実験および安全研究インフラの整備：可燃性ガス等の発生メカニズムの解明及び防爆対策の有効性評価

長岡技術科学大学　勝身俊之、鈴木正太郎、門脇敏

事業の目的と概要

福島第一原子力発電所において発生した水素爆発では、原子炉建屋の屋根等が吹き飛ばされ、建屋に甚大な損傷が及ぶこととなった。水素爆発事故の検証は進められているものの、事故時の水素の発生量、水素以外の可燃性ガスの発生量の把握は困難である。また、安全性の高い防爆対策の実施方法やその有効性の評価は、未だ十分な状況に至っておらず、速やかにかつ適切に対処する必要がある。水素等の可燃性ガスや危険物質（以下、「可燃性ガス等」という。）により、原子力施設の安全性が損なわれることがないよう適切に規制するには、a)可燃性ガス等の発生メカニズムの解明、発生量の評価、b)可燃性ガス等の防爆対策の有効性の評価、に関する研究が行える技術基盤の構築が必要である。

本事業の目的は、

a)シビアアクシデントを想定した環境下で、示差熱天秤−ガスクロマトグラフィ質量分析装置などにより、有機部材の熱分解特性および生成ガスの分析を行い、どのようなガスがどのような割合で生成されるかを明らかにすることである。

b)静的触媒式水素再結合装置（PAR）は水素濃度が高い場合に反応熱による水素爆発が懸念され、イグナイタは爆燃を許容していることから、安全性の高い防爆対策を燃焼実験(b-1)を行って開発し、その有効性を燃焼実験(b-1)並びに半定量的機能共鳴解析手法（以下、「半定量的FRAM」という。）を用いたリスク解析(b-2)を通して評価することである。

目標としているゴールは、

a)シビアアクシデント時などの高温環境において有機材料から発生する可燃性ガス等の種類と発生量を取得し、その危険性を正しく評価することである。そのために、示差熱-熱重量同時測定装置とガスクロマトグラフィ質量分析装置を導入し、これらを連携させることによって同時分析が可能なシステムを令和8年度中に構築し、原子力施設で使用されている有機材料を対象として様々な条件下で加熱時の質量変化、吸熱・発熱反応、生成ガス成分や各成分の発生量を取得し、令和10年度までにデータベースに整理して公開する。

b)可燃性ガス等に対応した安全性の高い本質的防爆対策を構築し、その防爆対策の有効性を適切に評価することである。そのために、安全性の高い本質的防爆対策として、可燃性ガス等の流れは許容するが燃焼波（爆燃波）は伝播させない装置を令和8年度中に作製して燃焼実験(b-1)を行い、燃焼場における可燃性ガス等を安全に強制燃焼させてガス濃度を低減する方策を令和9年度までに開発し、その防爆対策の有効性を燃焼実験(b-1)並びに半定量的FRAMを用いたリスク解析(b-2)を通して令和10年度までに評価する。

事業期間において構築される将来の規制上の研究課題に対処する技術基盤

可燃性ガス等により原子力施設の安全性が損なわれることがないよう適切に規制するため、次の評価・研究が行える技術基盤を令和10年度までに構築する。

a)可燃性ガス等の発生メカニズムの解明、発生量の評価、 b)可燃性ガス等の防爆対策の有効性の評価

この技術基盤を構築することにより、将来規制上必要となる可能性が高い福島第一原子力発電所原子炉建屋等の長期的な健全性の評価、原子力発電所等での事故時の可燃性ガス等の発生メカニズムや防爆対策の有効性に関する知見を提供することができる。

本事業は、長岡技術科学大学の教員を中心に、外部研究者、研究補助者としての学生等を雇用して実施している。本事業に携わる学生等が原子力規制に係る知識を身に付けることは、原子力人材の育成や確保に通じることになる。

事業の成果

(a)可燃性ガス等の発生メカニズムの解明

示差熱-熱重量同時測定（DTA-TG）のため、株式会社リガク社製TG-DTA8122（図1）を選定し、導入した。まずケーブル被覆材である塩化ビニル（PVC）や防水塗料であるエポキシ樹脂（EP）を試料として、熱分析に着手し、熱反応特性（質量変化、吸熱・発熱反応など）を取得した。分析の条件を表1、代表的な結果を図2,3に示す。（第64回燃焼シンポジウム, 2026）



図1　リガクTG-DTA8122

表1　DTA-TGの条件

試料容器	アルミニウム
試料量	7.5 ±0.5 mg
温度範囲	200 – 500 °C
昇温速度	10 °C/min
雰囲気ガス	N_2
ガス流量	100 mL/min

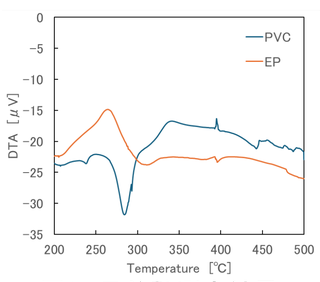


図2　示差熱測定結果

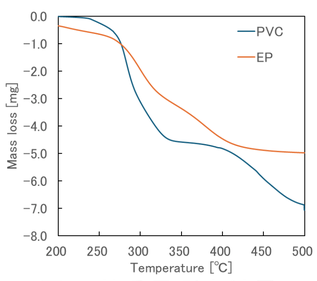


図3　熱重量測定結果

(b-1) 燃焼実験

水素の燃焼性状を調べ、安全に燃焼させるために必要となる条件を調査するための燃焼試験装置を製作した（図4）。この装置で水素は、所定の割合で空気と混合した後に燃焼器の下部に供給され、燃焼器内で火花着火により燃焼したあと、燃焼器上部から排出される。このときの燃焼挙動を詳細に観察するため、燃焼器の前後にある石英ガラスの窓を通して平行光を通し、シュリーレン法による可視化画像を得る。

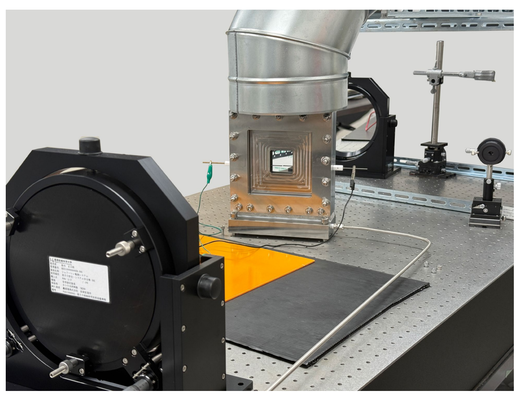


図4 燃焼実験装置

(b-2) 半定量的FRAMを用いたリスク解析

蓄積結合変動を用いた半定量的FRAMにより、建屋内の可燃性ガス濃度の制御に関するリスク解析を行った。そして、システム全体のリスクに重要な影響を及ぼす機能を同定し、効率的にリスクを低減し得る方策を提示した。得られた知見は、建屋内における可燃性ガスの爆発防止に寄与するとともに、可燃性ガスを取り扱うシステムの安全性向上に対して有益な示唆を与えるものである。

表2は、FRAMの機能と側面のリストを示したものである。また、図5は、FRAMマップを示したものである。トップ事象の蓄積結合変動を用いて，建屋内可燃性ガス濃度制御に関するリスクを解析し，感度解析を介して重要な機能を同定することができる。（第59回安全工学研究発表会, 2026）

表2　FRAMの機能と側面

機能	F1: 限界ガス濃度の設定　【技術】	機能	F7: 着火の操作　【人間】
側面	O: 設定濃度(F3-C)	側面	I: 介入の要求(F6-O) P: 着火の操作指示(F5-O) O: 操作後の状態(F10-I)
機能	F2:可燃性ガス濃度の測定　【技術】	機能	F8: 窒素パージの操作　【人間】
側面	O: 測定濃度(F3-I)	側面	I:介入の要求(F6-O) P: 窒素パージの操作指示(F5-O) O:操作後の状態(F10-I)
機能	F3:ガス濃度の比較　【技術】	機能	F9: 許容ガス濃度の設定　【技術】
側面	I: 測定濃度(F2-O); C: 設定濃度(F1-O) O: 濃度差(F6-I)	側面	O: 設定濃度(F11-C)
機能	F4: 責任の委譲　【組織】	機能	F10: 可燃性ガス濃度の測定　【技術】
側面	O: 責任委譲(F5-I)	側面	I: 操作後の状態(F7-O, F8-O) O: 測定濃度(F11-I)
機能	F5: 監視と操作指示　【人間】	機能	F11: ガス濃度の比較　【技術】
側面	I: 責任委譲(F4-O) O: 監視(F6-P), 着火の操作指示(F7-P), 窒素パージの操作指示(F8-P)	側面	I: 測定濃度(F10-O); C: 設定濃度(F9-O) O: 濃度差(F12-I)
機能	F6:可燃性ガス濃度の監視　【技術】	機能	F12:可燃性ガス濃度の制御　【技術】
側面	I: 濃度差(F3-O); P: 監視(F5-O) O:介入の要求(F7-I, F8-I)	側面	I: 濃度差(F11-O)

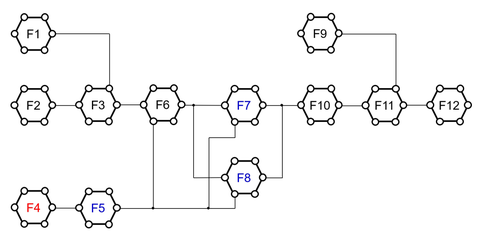


図5　FRAMマップ

今後の展開について

事業期間終了後、構築された技術基盤を活用し、原子力発電所等での事故時の可燃性ガス等の発生メカニズムや防爆対策の有効性に関する知見を社会へ幅広く発信する。これらの知見は、汎用性が高いことから、各種の新型炉に対しても適用可能となることが期待される。

原子力規制において、水素爆発が発生しないことは詳細に審査されているが、水素爆発が発生したときの評価は必ずしも十分でないと推察される。安全性を更に高めるには、水素爆発の発生を防止するのみならず、水素爆発を適切に評価し，その影響緩和策を検討することが求められる。

※本研究は、原子力規制庁の令和6−8年度原子力規制研究技術基盤構築事業費補助金（原子力規制研究の強化に向けた技術基盤構築事業）の補助を受けたものである。