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：原子力格納容器用高張力鋼板の水素燃焼と機械的性質の関係

長岡技術科学大学　[1]機械工学分野、[2]機械系
横山千華[1]、片山柊太[1]、花岡亮哉[1]、勝身俊之[2]、門脇敏[2]、本間智之[2]

事業の目的と概要

- 東京電力福島第一原子力発電所事故は、大量の水素が発生し**水素爆発**により原子炉建屋等が大きく損傷
- 水素の正確な発生量、水素以外の可燃性・有毒ガスの発生量の把握が困難
- 水素爆発や高温水蒸気により鉄筋等の構造材がダメージを受けている可能性が高く、長く続く廃炉作業を安全に行うには構造材の劣化を把握する必要
- 国内では高温工学試験研究炉（HTTR）による水素製造が計画
- **水素による材料の脆化**、事故による水素爆発が懸念される。さらに、国内新設炉には、**高張力鋼板**や鋼板コンクリートの利用が提案
- 原子力発電所の審査では、水素爆発が発生しないことを審査はしているが、水素爆発が発生したときの評価は未実施
- 安全性を高めるためには、水素爆発の発生防止に止まらず、発生した場合の影響緩和を検討するためにも水素爆発発生時の評価が不可欠
- 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、c)事故時の水素爆発や水素燃焼による構造材の材料特性への影響評価、d)水素爆発による格納容器等への影響評価に関する研究が行える技術基盤の構築が必要

本研究では、c)原子力格納容器に実用化されている2種類の**高張力鋼板（SGV480およびSPV490）**を用い、水素爆発による衝撃と**水素燃焼実験**を行い、ミクロ組織解析、引張試験、硬さ試験、水素分析等によるマルチスケール解析を通して、水素脆化が材料の機械的性質に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

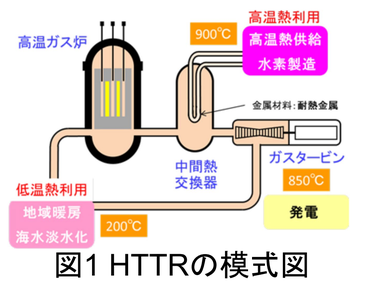


図1 HTTRの模式図
出展：JAEA

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

- 設備
- 体制
- 人材育成

⇒

- 爆発・燃焼条件と材料劣化を結びつけるマルチスケール解析手法（デジタルイメージ相関法、マイクロ引張試験、疲労試験）を導入
- 水素爆発・燃焼システムを自作で構築
- d)との連携により、爆発の影響を評価するための基礎物性値と劣化指標を提示
- 水素脆化させた高張力鋼板に対する、機械的性質の評価とミクロ組織の関係が理解できる学生教育
- 原子炉安全、水素安全技術を理解した共同教育の実施（a)~M)までの教員間連携）

事業の成果

• 水素燃焼実験装置の製作

様々な大きさのサンプルに対して、安全かつ再現性のある水素燃焼を実施するために実験装置をin-houseで製作した（図2）。

この装置により、サンプル間での燃焼温度や時間をおおよそ制御することができた（図3）。燃焼温度は東京電力ホールディングスによるMAAP5.01格納容器温度の解析結果[1]より、400°C付近を目標値として設定した。

1)東京電力ホールディングス株式会社, MAAP5による最新の解析結果」

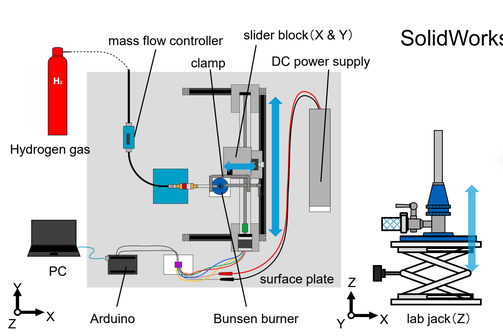
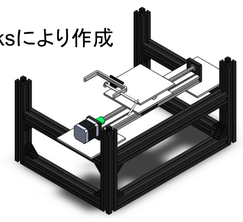


図1 水素燃焼実験装置

SolidWorksにより作成



水素燃焼装置の動画

https://www.youtube.com/watch?v=EeAPQeITrJs&source_ve_path=OTY3MTQ&embeds_referring_euri=https%3A%2F%2Fwww.mirai-kougaku.jp%2F

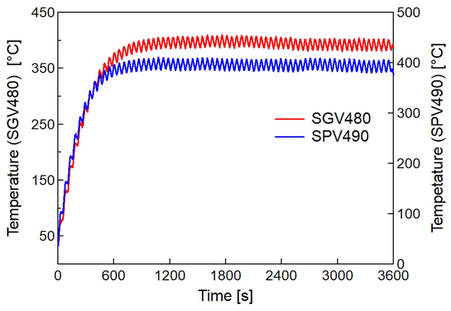
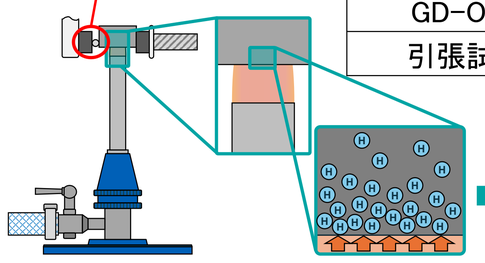


図2 水素燃焼実験による温度変化

温度測定箇所



水素燃焼イメージ

• 供試材

水素燃焼前の供試材（SGV480およびSPV490）の状態を確認するために、ミクロ組織観察を実施し、それぞれフェライト+パーライト、ベイナイト組織が見られた（図4）。

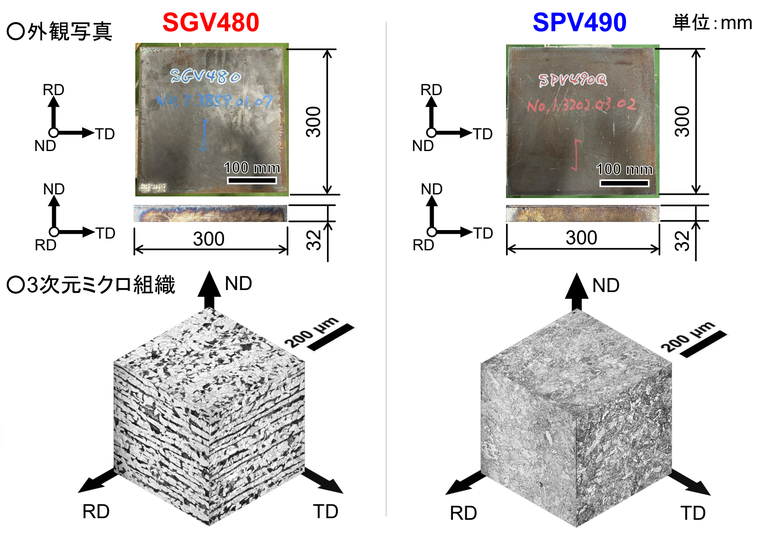


図4 供試材

RD：圧延方向 rolling direction
TD：直角方向 transverse direction
ND：法線方向 normal direction

• 実験の流れ

製作した実験装置にて短時間の水素燃焼を実施し（表1）、分析や試験を実施した。

表1 サンプルの燃焼条件

試験種別	燃焼条件
GD-OES	20min
引張試験	0、30、60min × 2サンプル

今回の成果

- 水素分析
- 引張試験

⇒ 短時間の水素燃焼の影響を評価

⇒ 実験回数を重ねた後、長時間の燃焼条件を実施する。

• サンプル中の水素分析

グロー放電発光分析装置（GD-OES）を用いて水素燃焼を実施したサンプルの深さ方向の水素分析を実施した（図5）。

短時間の燃焼条件では、表面から0.5~1μm程度の位置まで水素が侵入することを明らかにした（WQ：水冷、AC：空冷）。

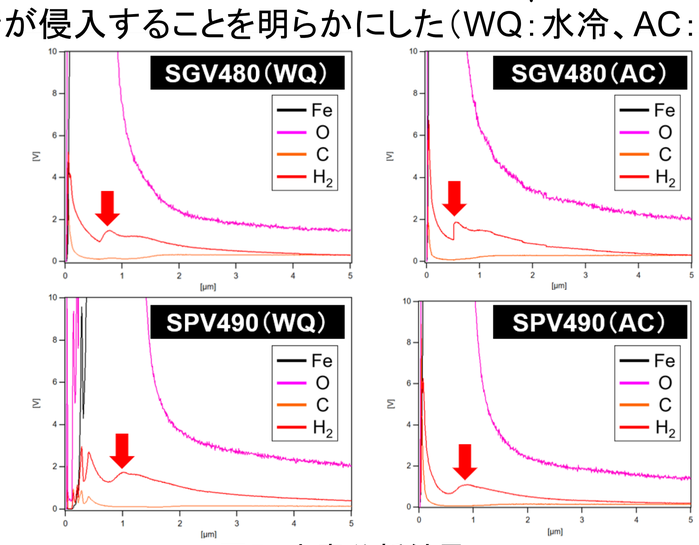


図5 水素分析結果

• 機械的性質の評価

未燃焼サンプル（0min）と水素燃焼を実施したサンプルを引張試験を実施し、応力ひずみ曲線（図6）を比較した。

燃焼による顕著な変化は見られず、短時間の水素燃焼および最表面に侵入した水素では、SGV480で破断伸びにわずかに影響を及ぼすことがわかった。

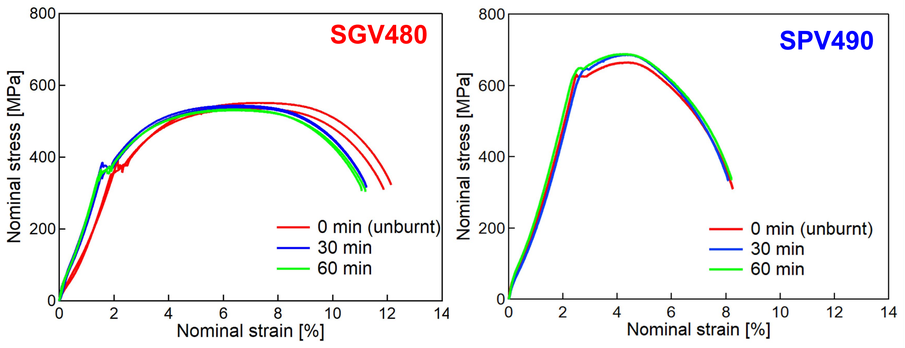


図6 引張試験結果

今後の展開について

水素燃焼時間と試料温度を制御し、水素導入量を増加させて加速試験を実施する。水素の表面脆化挙動を明らかにするため、マイクロ引張試験を実施して、強度・延性に及ぼす含有水素の影響を明らかにする。また、SGV480と高強度SPV490における水素脆化挙動に差が見られるか、表面の脆化挙動に敏感な回転曲げ疲労試験による水素脆化の影響、後方散乱電子回折・X線回折・中性子回折を組み合わせた、水素燃焼に応じた表面のひずみ変化を定量的に評価する予定である。

※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。