

MOX燃料加工施設における グローブボックス火災に関する研究

2023年8月31日(木)

技術基盤グループシステム安全研究部門

瀧澤 真



目次

1. 背景
2. GB火災の特徴及び研究目的
3. GB火災の事象進展に関する知見の取得
 - 3.1 GB火災の事象進展に関する知見
 - 3.2 GB火災の事象進展に関する知見の取得状況
4. GB火災における火災防護対策を考慮した解析
5. まとめ、今後の予定



1. 背景
2. GB火災の特徴及び研究目的
3. GB火災の事象進展に関する知見の取得
 - 3.1 GB火災の事象進展に関する知見
 - 3.2 GB火災の事象進展に関する知見の取得状況
4. GB火災における火災防護対策を考慮した解析
5. まとめ、今後の予定



背景

- ◆ 原子力規制検査では、多数の機器・設備を検査の対象としている。
- ◆ これらの対象機器等の事故対策への貢献度(重要度)を明確にし、優先順位を設けることで、効率的かつ効果的な検査が可能になると考えられる。
 - 機器等の重要度の明確化に当たっては、事象進展を明らかにし、想定される事故シナリオの不確かさを低減することが重要である。(核燃料物質の放出量、余裕時間等に関する評価の精度を高めることができると考えられる。)
- ◆ 混合酸化物燃料(MOX燃料)加工施設においては、想定される事故シナリオとして、特徴的な事象であるグローブボックス(GB)火災に関するものが重要であると考えられる。

<GB火災の選定理由>

- **GB火災**は、重大事故(核燃料物質等を閉じ込める機能の喪失)に関連する事象であり、核燃料物質の放出量が最も大きくなると想定される。
- GBの構成材料に有機材料を使用⇒GB自体が火災源となる可能性
- GBが施設内に多数存在 ⇒GB間の延焼・火災規模の拡大の可能性

GB火災の特徴及び研究目的

【GB火災の特徴】

- **GB内火災**又は**GB外火災**(GB自体の燃焼を含む)に大別され、解析における検討項目(可燃物、閉じ込め機能を担う機器等)が異なる。
- GB構成材料の熱分解・燃焼、ばい煙発生等の現象、GB間での延焼等の可能性
⇒ **GB火災の事象進展に伴う火災の挙動が複雑**



研究全体の目的

本研究の目的

「**GB火災の事象進展に関する知見**」及び「**GB火災の事象進展を評価するための解析手法**」を取得・整備し、火災の挙動を明らかにする。



事故シナリオの不確かさを低減し、対象機器等の事故対策への貢献度(重要度)の評価に活用する。



1. 背景
2. GB火災の特徴及び研究目的
3. **GB火災の事象進展に関する知見の取得**
 - 3.1 **GB火災の事象進展に関する知見**
 - 3.2 **GB火災の事象進展に関する知見の取得状況**
4. GB火災における火災防護対策を考慮した解析
5. まとめ、今後の予定



GB火災の事象進展に関する知見

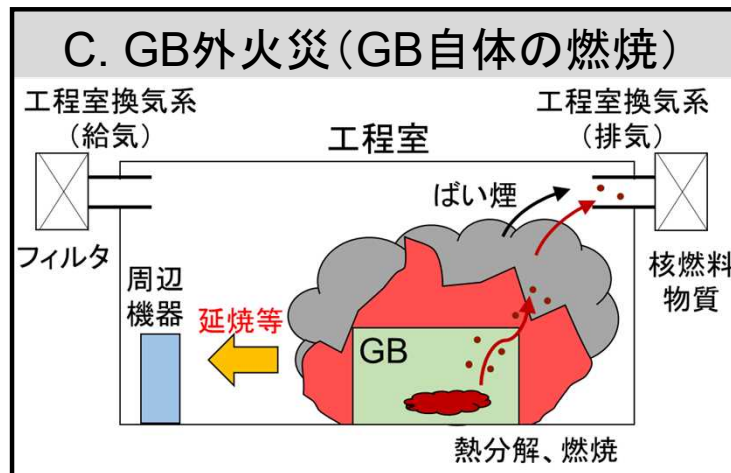
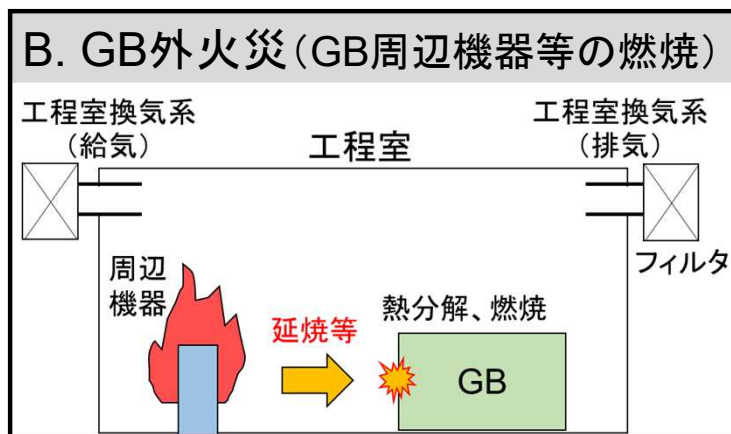
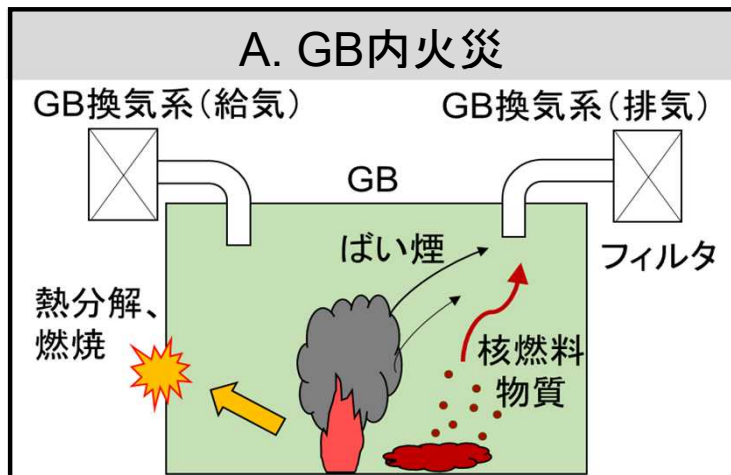


表 GB火災の事象進展に関する知見の一覧

NO.	事象	知見
A-1	GB内火災	内部の火災によるGB健全性への影響 <ul style="list-style-type: none"> GB構成材料の熱分解・燃焼特性 GB内圧力等の変化
A-2		GB換気系の健全性への影響 <ul style="list-style-type: none"> ばい煙によるフィルタの目詰まり
B-1	GB外火災 (GB周辺機器等の燃焼)	外部の火災によるGB健全性への影響 <ul style="list-style-type: none"> GB構成材料の熱分解・燃焼特性 周辺機器等からGBへの延焼
C-1	GB外火災 (GB自体の燃焼)	GBの燃焼によるGB周辺機器への影響 <ul style="list-style-type: none"> GB自体の燃焼特性 GBから周辺機器等への延焼
C-2		工程室換気系の健全性への影響 <ul style="list-style-type: none"> ばい煙によるフィルタの目詰まり
D-1	GB内火災 及びGB外 火災共通	GB火災時の核燃料物質の移行挙動
D-2		火災防護対策による閉じ込め機能への影響 <ul style="list-style-type: none"> GB内等の酸素濃度低下による燃焼反応の抑制 消火ガス供給によるGB内等の圧力上昇



GB火災の事象進展に関する知見の取得状況

【既往の安全研究プロジェクトの成果】

GB火災における基礎的な知見・データを取得：

- GB構成材料の熱分解・燃焼特性 (A-1、B-1)
- ばい煙によるフィルタの目詰まり (A-2)
- GB内火災時のGB内圧力等の変化、GB換気系への影響 (A-1、A-2)

JAEAへの委託試験^{[1]-[3]}

規制庁の火災影響解析

【現行の安全研究プロジェクトの検討項目】

- GB自体の燃焼特性、工程室換気系への影響 (C-1、C-2)
- GB火災時の核燃料物質の移行挙動 (D-1)
- 火災防護対策による閉じ込め機能への影響 (D-2)

仏国放射線防護原子力安全研究所 (IRSN) との協定^{※1}に基づくFIGARO^{※2}プロジェクトの試験等^[4]

※1: RESEARCH AGREEMENT ON THE IRSN GLOVE BOX FIRES PROGRAM
※2: Fires Involving Glove boxes with Aerosol Release Occurrences

火災防護対策による影響に関する検討は、GB内圧力等の基礎データの取得を含めて、ほとんど行われていない。

火災防護対策が閉じ込め機能に対する影響に関する基礎データ及び知見を取得するため、当該対策を考慮した解析を実施している^[5]。(本発表で報告)



1. 背景
2. GB火災の特徴及び研究目的
3. GB火災の事象進展に関する知見の取得
 - 3.1 GB火災の事象進展に関する知見
 - 3.2 GB火災の事象進展に関する知見の取得状況
4. GB火災における火災防護対策を考慮した解析
5. まとめ、今後の予定

火災防護対策を考慮した解析の目的、実施概要

【GB内火災解析に関する課題】

GB内火災時の火災防護対策が施設の閉じ込め機能に及ぼす影響に関する検討は、その影響を評価するための基礎データの取得を含めて、これまでほとんど行われていない。

【本解析の目的】

GB内圧力、換気流量等の変化について解析を行い、火災防護対策が施設の閉じ込め機能に及ぼす影響を評価するための基礎データを取得する。

【実施内容】

解析コードSYLVIA※1を用いて、火災防護対策を含む事象進展シナリオを対象に、GB内火災の解析を実施し、GB内圧力等を取得する。

● 本検討の実施手順

- (1) 解析用GB火災シナリオの設定
 - (1-1) GB及び換気系モデルの構築
 - (1-2) 解析用GB火災シナリオの設定
- (2) シナリオを対象とした火災解析

※1 SYLVIA (開発元:IRSN)

- 火災が発生する区画を高温層と低温層の2層に分割し、各層の温度、酸素濃度等が均一であるとして評価
- 液体燃料の燃焼のモデル化・評価が可能 ⇒ ①
- 火災防護対策のモデル化・評価が可能 ⇒ ②
- 区画内圧力の変動及び換気系の応答評価が可能 ⇒ ③

表 GB内火災の特徴

	GB内火災の特徴
①主な可燃物	液体可燃物(機械油、アルコール)
②火災防護対策	ダンパ閉止、排風機の停止、消火剤の供給
③閉じ込め機能を担うSSC	GB※2、GB換気系(ダンパ、フィルタ等)

※2 GBはGB換気系により負圧維持されている



火災解析用のGB火災シナリオの設定

【MOX燃料加工施設を想定したGB及び換気系モデルの構築】

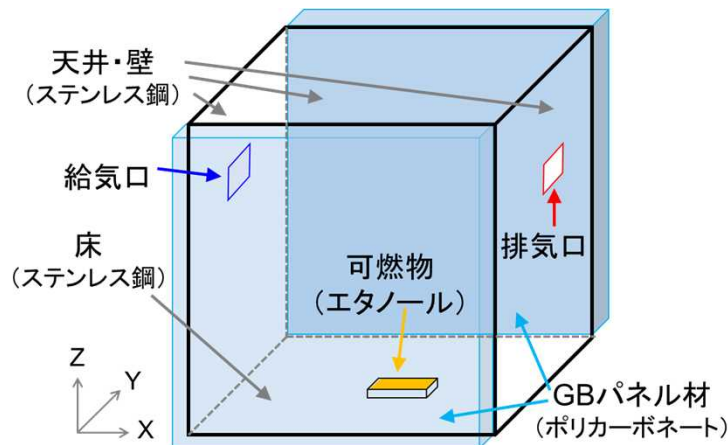


図 MOX燃料加工施設を想定したGBの概略図

表 GBモデル等の主な条件

項目	設定
GBの寸法	3.1 m × 3.1 m × 3.1 m
GBの換気流量(換気回数)	179 m ³ /h (6回/h)
GBの初期雰囲気	空気
GBの初期ゲージ圧力	-400 Pa
GBの初期温度	26.15 °C
工程室のゲージ圧力	-100 Pa

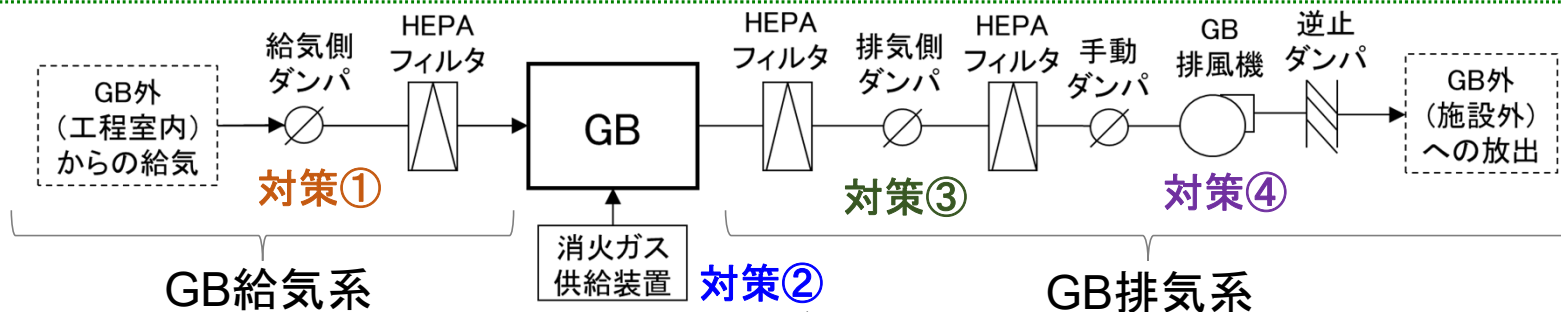


図 換気系モデルの系統図

【本研究で設定した火災解析用のGB火災シナリオ】



図 火災解析用のGB火災シナリオ

解析条件①(解析の概要及び換気系ネットワークモデル)

【解析の概要】

- 換気系モデルに基づき、SYLVIAにおける換気系ネットワークモデルを構築
- 火災防護対策をモデル化
- 主な評価項目: GB内圧力、換気流量、発熱速度及びGB内酸素モル分率

【換気系ネットワークモデル】

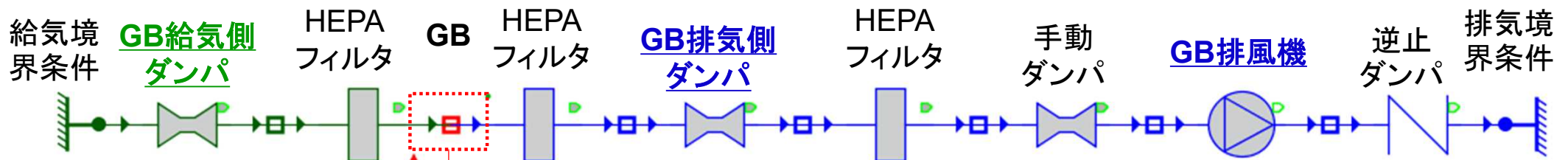


図 換気系ネットワークモデル

● GBの解析モデル

- 火災が発生する区画を上下層の2層に分割して計算するモデルを設定
- GBモデルの寸法等に基づき形状データを設定
- 液体燃料の燃焼モデルを設定

※GBの破損等によるGB内雰囲気はGB外へのリークは考慮しない。

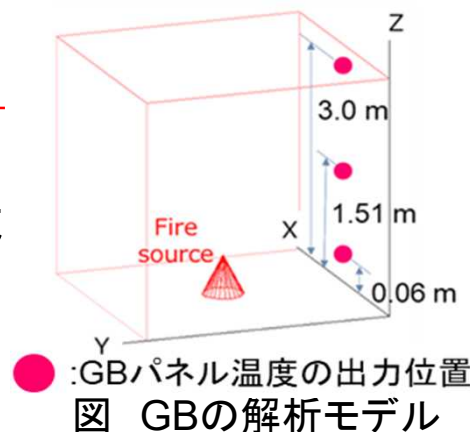


表 換気設備に関する設定

機器	設定項目	設定値
GB給気側ダンパ	初期流量	179 m ³ /h
	流路抵抗(開放時)	3.4 × 10 ³ m ⁻⁴
GB排気側ダンパ	初期流量	179 m ³ /h
	流路抵抗(開放時)	3.4 × 10 ³ m ⁻⁴
GB排風機	初期流量	179 m ³ /h



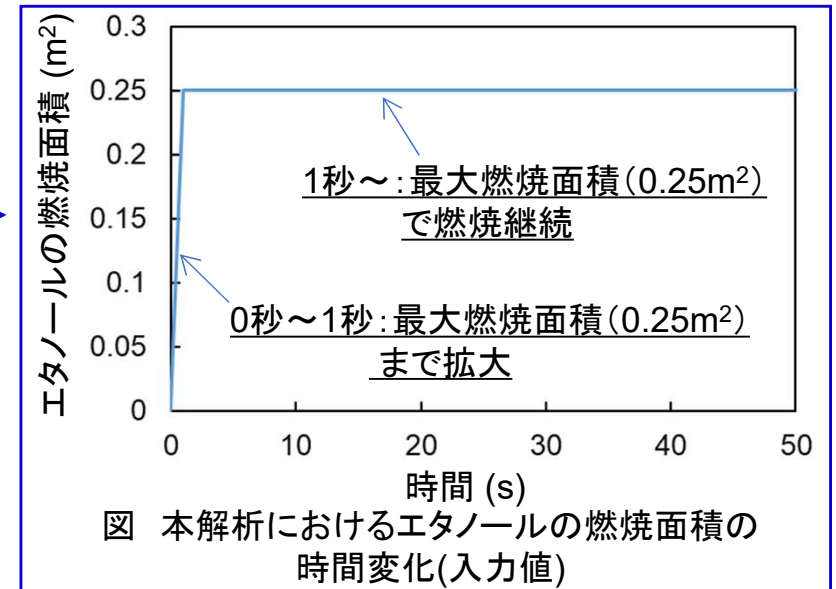
解析条件②(液体燃料の燃焼モデルの設定)

【液体燃料の燃焼時の質量減少速度】

- 燃焼面積の時間変化を入力
- 酸素濃度の変化による影響をPeatross and Beyler 相関^[6]により考慮し、質量減少速度を補正

$$\dot{m} = m_{\infty} S(t) (10X_{O_2} - 1.1) \quad \text{式(1)}$$

\dot{m} : 燃焼時の質量減少速度 (kg/s)
 m_{∞} : 大気中の単位面積当たりの質量減少速度 (kg/s/m²)
 $S(t)$: 燃焼面積の時間変化 (m²)
 X_{O_2} : 酸素モル分率 (-)



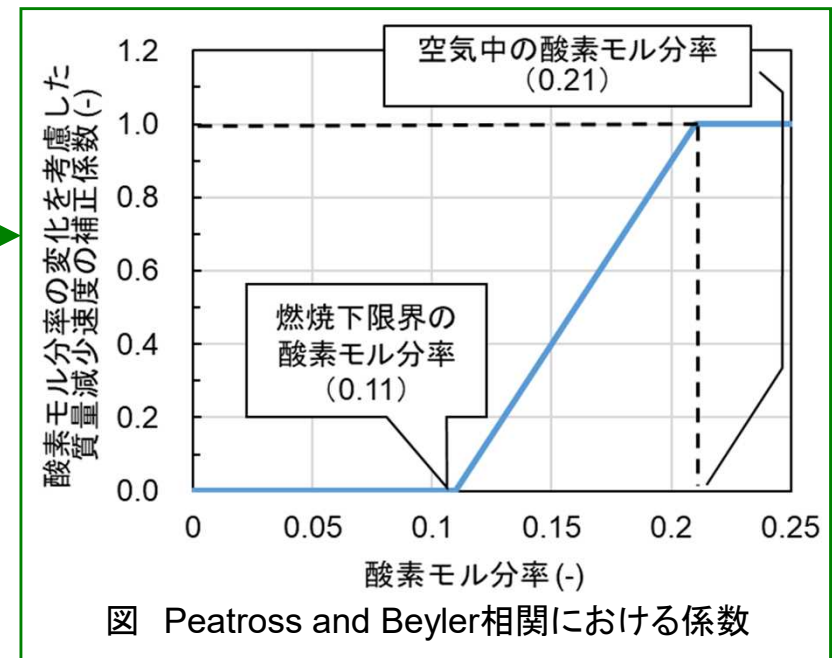
【液体燃料の燃焼時の発熱速度】

$$\dot{Q} = \dot{m} \Delta H_c \quad \text{式(2)}$$

\dot{Q} : 発熱速度 (W)
 ΔH_c : 燃料の単位質量当たりの発熱量 (J/kg)

表 本解析における燃焼モデルに関する設定

項目	設定
燃焼物	エタノール
大気中の単位面積当たりの質量減少速度	0.015 kg/s/m ²
最大燃焼面積	0.25 m ²
燃料の単位質量当たりの発熱量	2.68 × 10 ⁷ J/kg
燃料の重量	4.74 kg





解析条件③(火災防護対策の設定及び解析ケース)

【火災防護対策の設定】

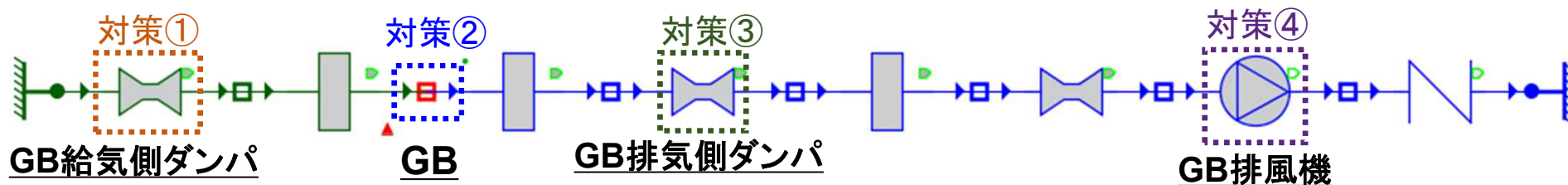
NO.	火災防護対策	火災防護対策のモデル化			実施の タイミング※3、※4
		パラメータ	対策実施前	対策実施時	
対策①	GB給気側ダンパの閉止	流路抵抗	$3.4 \times 10^3 \text{ m}^{-4}$ ※2	閉止時: 10^7 m^{-4} ※4	12秒
対策②	GB内への消火ガス※1供給	消火ガス流量	0 m ³ /h	供給時: $179 \text{ m}^3/\text{h}$ ※3	13秒～313秒
対策③	GB排気側ダンパの閉止	流路抵抗	$3.4 \times 10^3 \text{ m}^{-4}$ ※2	閉止時: 10^7 m^{-4} ※4	314秒
対策④	GB排風機の停止	排気流量	$179 \text{ m}^3/\text{h}$ ※3	停止時: $0 \text{ m}^3/\text{h}$	314秒

※1 消火ガスは窒素ガスを設定

※2 SYLVIAで計算

※3 事業者の公開資料を参考に設定

※4 SYLVIAの開発元との情報交換を踏まえて設定



【解析ケース】

NO.	火災防護対策の有無	消火ガスの供給流量
Case 1	有	$179 \text{ m}^3/\text{h}$
Case 2	無	設定無し
Case 3	有	$45 \text{ m}^3/\text{h}$
Case 4	有	$90 \text{ m}^3/\text{h}$
Case 5	有	$360 \text{ m}^3/\text{h}$

火災防護対策の有無による影響の確認

消火ガスの供給流量の影響の確認



解析結果(火災防護対策の有無による影響)

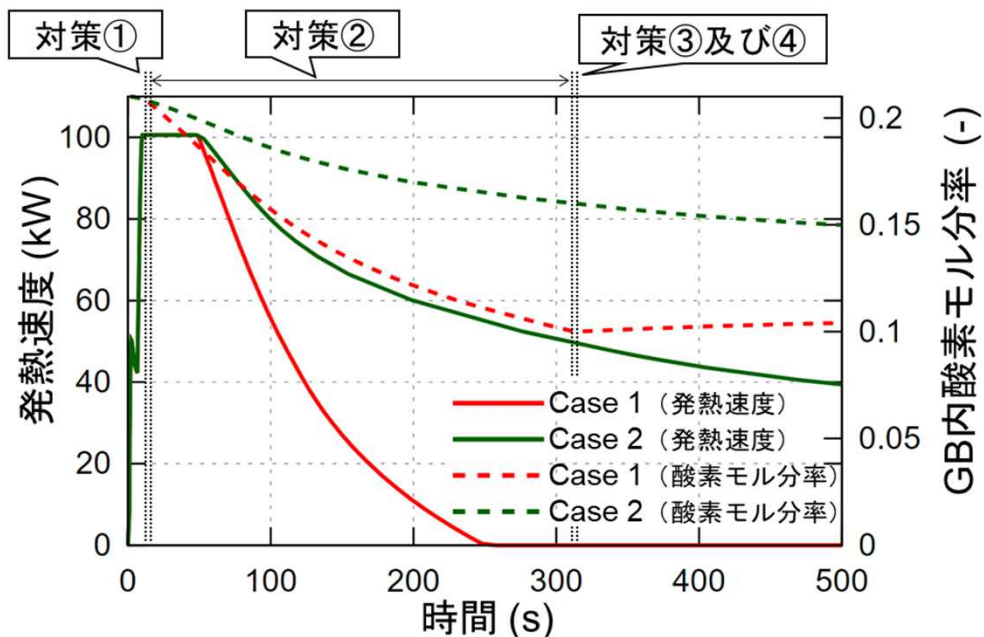


図 発熱速度及びGB内酸素モル分率の解析結果

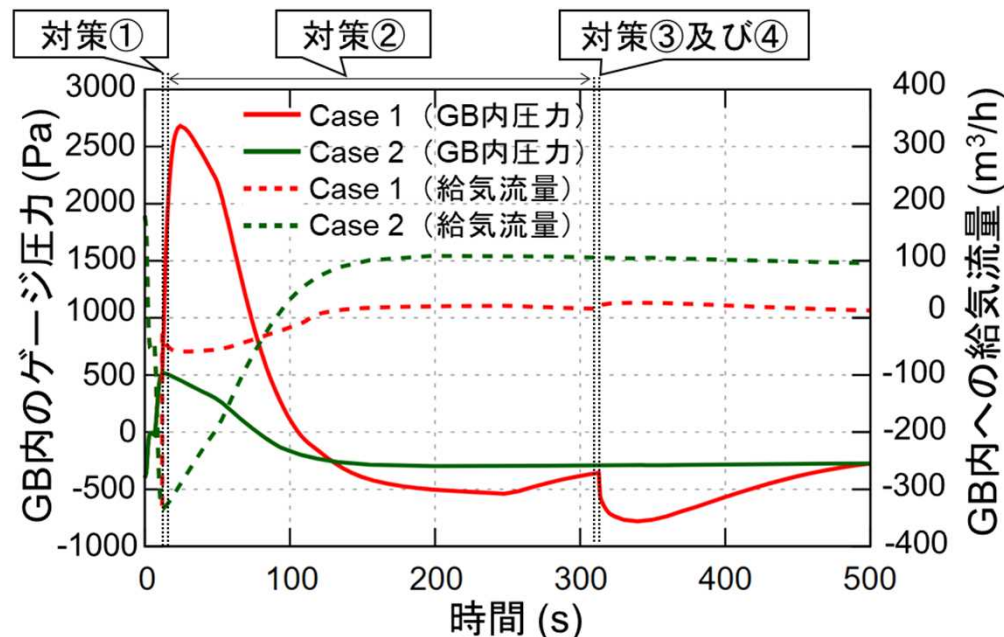


図 GB内圧力及び給気流量の解析結果

※給気流量が負の場合：
GB内からGB給気側への逆流が発生

火災防護対策の影響：

- GB内酸素モル分率及び発熱速度：**低下** ⇒ **燃焼反応の抑制**
- GB給気側への逆流時流量：**低下** ⇒ **給気側フィルタへの影響軽減**
- GB内圧力の最高値：**上昇** ⇒ **圧力上昇の増大**

火災防護対策は、**燃焼反応の抑制等の効果**を示すが、**GB内圧力を上昇**させる可能性があるとして評価された。



解析結果(消火ガスの流量による影響)

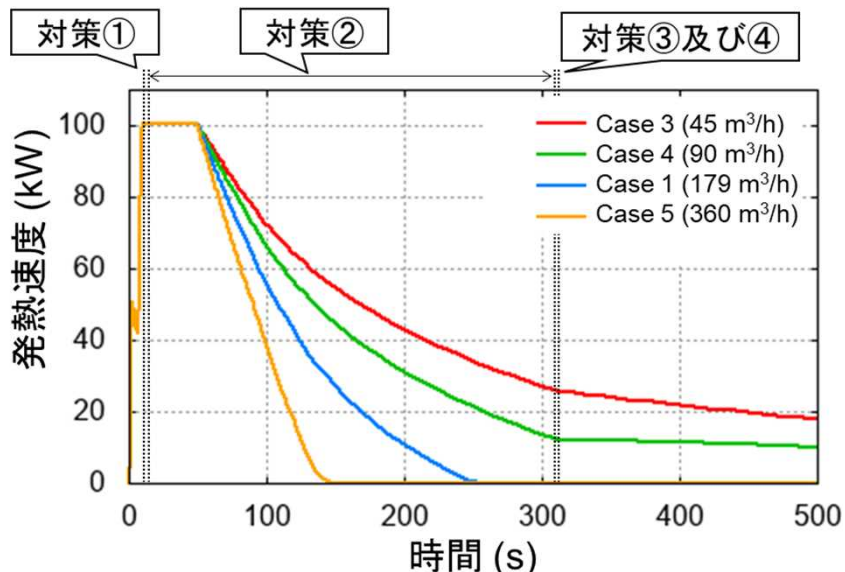


図 発熱速度の解析結果

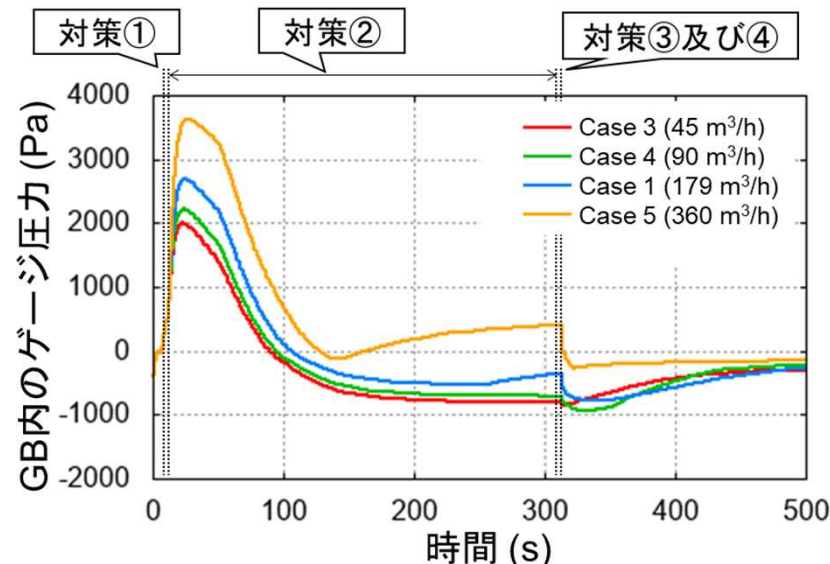


図 GB内圧力の解析結果

【消火ガスの流量が大きい場合 (Case 1及びCase 5)】

- 発熱速度: **低下** ⇒ **燃焼反応の抑制効果: 大**
- GB内圧力の最高値: **高** ⇒ **圧力上昇に対する影響: 大**

【消火ガスの流量が小さい場合 (Case 3及びCase 4)】

- 発熱速度が **0 kWまで低下しない (=消炎しない)**。
⇒ **燃焼による可燃物の消費速度が低下** ⇒ **燃焼継続時間が長くなる可能性**

消火ガスの供給流量:

- ✓ 流量大: **抑制効果**及び**圧力上昇**の影響が大きい
- ✓ 流量小: **抑制効果**が**小さく**、**燃焼継続時間が長い可能性**



火災防護対策を考慮した解析のまとめ

- GB火災の事象進展を評価するための解析手法整備の一環として、GB内火災における火災防護対策を考慮した解析を実施した。
- 本解析結果から火災防護対策が施設の閉じ込め機能に及ぼす影響を評価するための基礎データとして、GB内圧力等の変化について検討し、次の知見を得た。
 - 火災防護対策は、燃焼反応の抑制等の効果を示すが、その一方でGB内圧力を上昇させる可能性があると評価された。
 - 消火ガスの供給流量が大きい場合には、燃焼反応の抑制等の効果が大きいですが、圧力上昇の影響も大きくなると評価された。
 - 消火ガスの供給流量が小さい場合には、抑制効果が小さくなる。その結果、燃焼による可燃物の消費速度が低下し、燃焼継続時間が長くなる可能性があるとして評価された。

【火災防護対策を考慮した解析に関する今後の予定】

- 火災防護対策の条件を対象とした感度解析を実施し、知見を拡充する。(令和5年度実施中)
- GB外火災における火災防護対策を考慮した解析を実施し、知見を取得する。(令和6年度実施予定)



1. 背景
2. GB火災の特徴及び研究目的
3. GB火災の事象進展に関する知見の取得
 - 3.1 GB火災の事象進展に関する知見
 - 3.2 GB火災の事象進展に関する知見の取得状況
4. GB火災における火災防護対策を考慮した解析
5. **まとめ、今後の予定**



まとめ、今後の予定

◆ MOX燃料加工施設における**GB火災**の事象進展に関する**知見**の取得状況は以下のとおり。

- GB自体の燃焼特性、工程室換気系への影響 (C-1、C-2)
- GB火災時の核燃料物質の移行挙動 (D-1)



FIGAROプロジェクトにおいて関連する**知見**及びデータを取得中

- 火災防護対策による閉じ込め機能への影響 (D-2)



GB内火災の火災防護対策に関する**知見**及びデータを取得した。

【今後の予定】

- GB火災の事象進展に関する**知見**の取得
 - ✓ C-1、C-2及びD-1: FIGAROプロジェクトに参画し、令和6年度までに完了見込み
 - ✓ D-2: **GB外火災**対策を考慮した解析等を実施し、令和6年度までに完了見込み
- GB火災の事象進展を評価するための**解析手法**の整備
 - ✓ 上記の**知見**等を踏まえ、令和7年度までに完了見込み



参考文献

- [1] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成29年度原子力規制庁委託成果報告書再処理施設等における火災事故時影響評価試験、平成30年3月.
- [2] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成30年度原子力規制庁委託成果報告書再処理施設等における火災事故時影響評価試験、平成31年3月.
- [3] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成31年度原子力規制庁委託成果報告書再処理施設等における火災事故時影響評価試験、令和2年3月.
- [4] Pascal Zavaleta et al., “CHARACTERIZATION OF THE PLUTONIUM DIOXIDE AIRBORNE RELEASE FRACTION DURING GLOVE BOX FIRES IN NUCLEAR FUEL FABRICATION AND REPROCESSING PLANTS”, 30th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE30), 25th May, 2023.
- [5] 瀧澤 真、櫻井 智明、「グローブボックス火災の事象進展評価における火災解析に関する検討」、日本原子力学会 2023 年春の年会 東京大学駒場キャンパス、令和 5 年 3 月.
- [6] M.J. Peatross and C.L. Beyler, “Ventilation effect on compartment fire characterization” Fire Safety Science Proceedings of 5th international symposium, pages 403-414, 1996.