

日本原子力学会原子力安全部会 第6回夏期セミナー  
2018年8月20日(月)～22日(水) 福島 土湯温泉「ホテル山水荘」

「再稼働審査での経験と今後へ活かしたい事例紹介(若手セッション)」

## PWRにおける水素対策について

2018.8.21

三菱重工業株式会社  
パワードメイン 原子力事業部  
炉心・安全技術部 安全解析技術課  
原井康考

1. 事故時発生水素に関する審査指針・基準
2. PWR格納容器の特徴
3. PWRにおける水素発生の要因
4. PWRにおける水素対策の概要
5. PWRにおける水素対策の審査での議論

## 設計基準事故

「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」

### 3.4.2 可燃ガスの発生

- 事故発生後少なくとも30日間は、原子炉格納容器内雰囲気中の酸素又は水素の濃度のいずれかが、それぞれ5vol%又は4vol%以下であること

## 重大事故

「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」  
第37条

- 原子炉格納容器が破損する可能性のある水素の爆轟を防止すること。  
⇒原子炉格納容器内の水素濃度がドライ条件に換算して13vol%以下  
又は酸素濃度が5vol%以下であること
- 可燃性ガスの蓄積、燃焼が生じた場合においても、原子炉格納容器バウンダリにかかる圧力が最高使用圧力または限界圧力を下回ること。

## 設計基準事故

「発電用軽水型原子炉施設の安全評価に関する審査指針」

### 3.4.2 可燃ガスの発生

- 事故発生後少なくとも30日間は、原子炉格納容器内雰囲気中の酸素又は水素の濃度のいずれかが、それぞれ5vol%又は4vol%以下であること

## 重大事故

## 本日の発表

「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈」  
第37条

- 原子炉格納容器が破損する可能性のある水素の爆轟を防止すること。  
⇒原子炉格納容器内の水素濃度がドライ条件に換算して13vol%以下  
又は酸素濃度が5vol%以下であること
- 可燃性ガスの蓄積、燃焼が生じた場合においても、原子炉格納容器バウンダリにかかる圧力が最高使用圧力または限界圧力を下回ること。

## 2. PWR格納容器の特徴

### 国内既設PWRの特徴

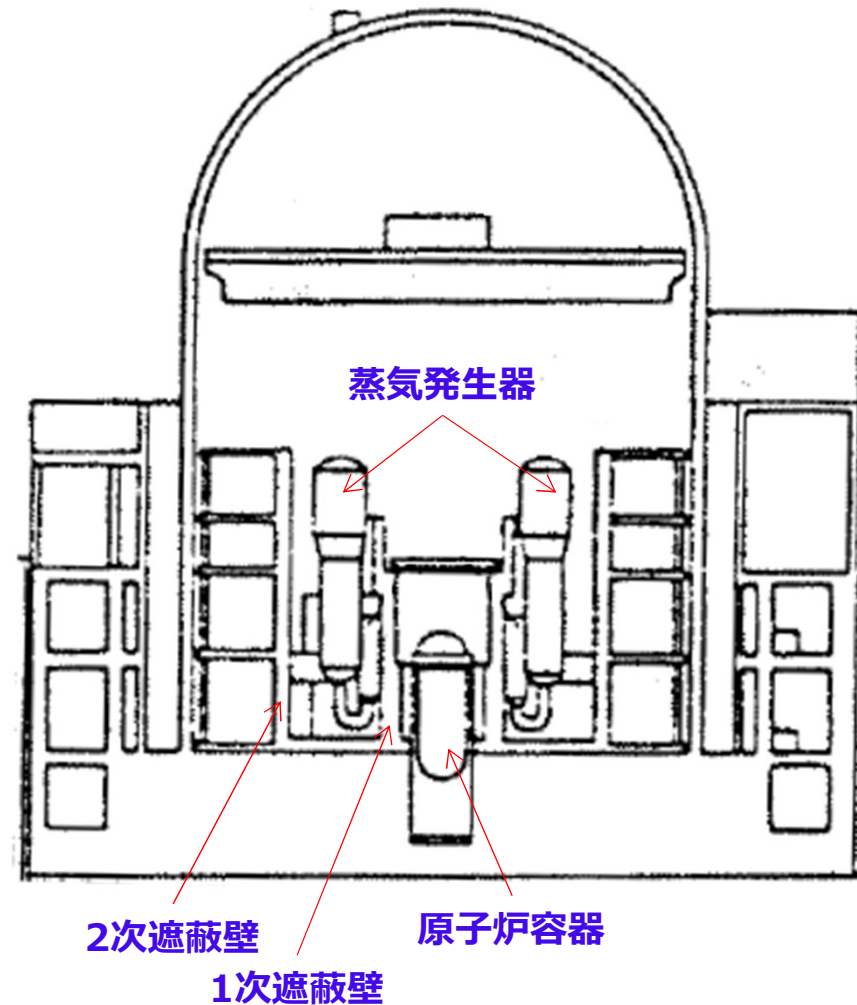
- CV体積はおよそ6万～8万m<sup>3</sup>  
(LOCA時圧力<CV最高使用圧力)
- CV下部中央に位置する原子炉を取り囲む1次遮へい壁、2次遮へい壁、及び各フロア等により、CV下部は複数の区画に分割される。

※各壁、フロアには十分な開口があり、完全に隔離される区画は存在しない。

- 運転員立ち入りのため、通常状態でのCV内雰囲気は空気

※ CV: Containment Vessel  
LOCA : Loss Of Coolant Accident

(例) 代表4ループプラント



### 3. PWRにおける水素発生の要因

- **燃料棒被覆管の酸化**

炉心損傷時、被覆管のジルコニウムと水蒸気が反応することで水素が発生する。有効性評価では、全炉心内のジルコニウムの75%が水と反応すると想定。

- **放射線水分解**

放射線の一部が水分子の分解に寄与し、水素と酸素が発生する。シビアアクシデントの進展が収束した後も長期的に継続する。

- **金属腐食**

CV内のアルミニウム及び亜鉛とCVスプレイ水の反応により、水素が発生する。

- **熔融炉心・コンクリート相互作用 (MCCI)**

原子炉容器破損後、原子炉下部キャビティに落下した熔融炉心とCV下部のコンクリートとの相互作用により、金属の酸化反応が生じ、水素が発生する。

※ MCCI: Molten Core-Concrete Interaction

## 4. PWRにおける水素対策の概要(1/4)

PWRプラントではCVに多量の空気が存在するため、水素処理設備により、水素濃度を下げることによって規制基準（ドライ水素濃度13vol%以下又は酸素濃度が5vol%以下）を満足させる

### 水素処理設備

- **静的触媒式水素再結合装置（PAR）**
- **イグナイタ**

※ PAR: Passive Autocatalytic Recombiner

## 4. PWRにおける水素対策の概要(2/4)

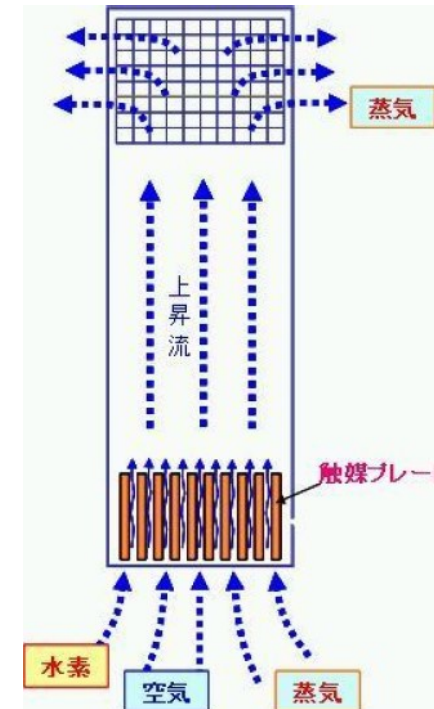
### 静的触媒式水素再結合装置 (PAR)



出典：関西電力殿ホームページを基に作成



触媒プレート  
(触媒：白金系金属)



**触媒反応により水素と酸素を再結合させることで水素を処理**

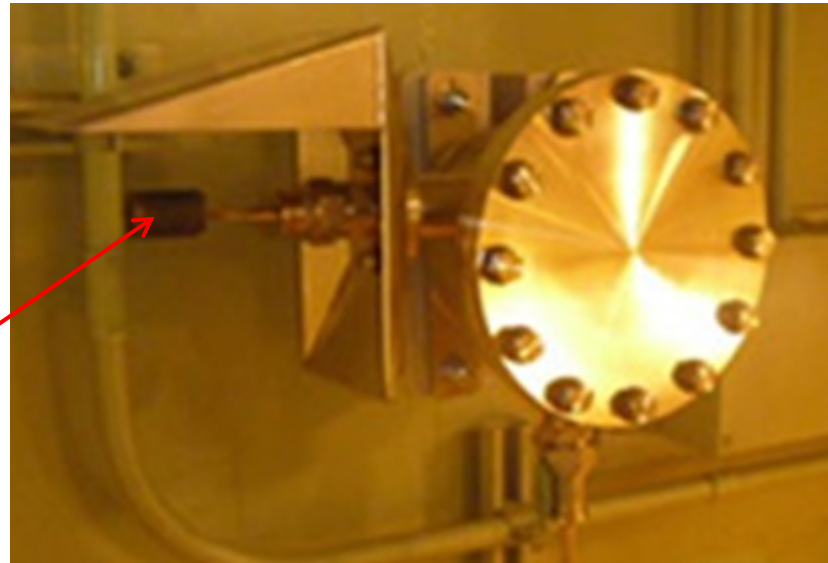
- 低水素濃度でも水素処理可能

**主に長期的に緩やかに発生し続ける水素の処理が目的**



### イグナイタ

ヒーティングコイル



出典：関西電力殿ホームページを基に作成

#### **高温のヒーティングコイルにより、周囲の水素を強制的に燃焼処理**

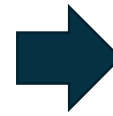
- 通電によりコイル部は約900℃まで昇温
- 周囲水素濃度が6,7%程度で水素が燃焼

#### **主に事象初期の放出水素の処理が目的**

- 水素放出が想定される箇所近傍や水素の主要な流路上に設置することで、効果的に水素を燃焼させ、格納容器内の水素濃度を瞬時に低下させることが可能

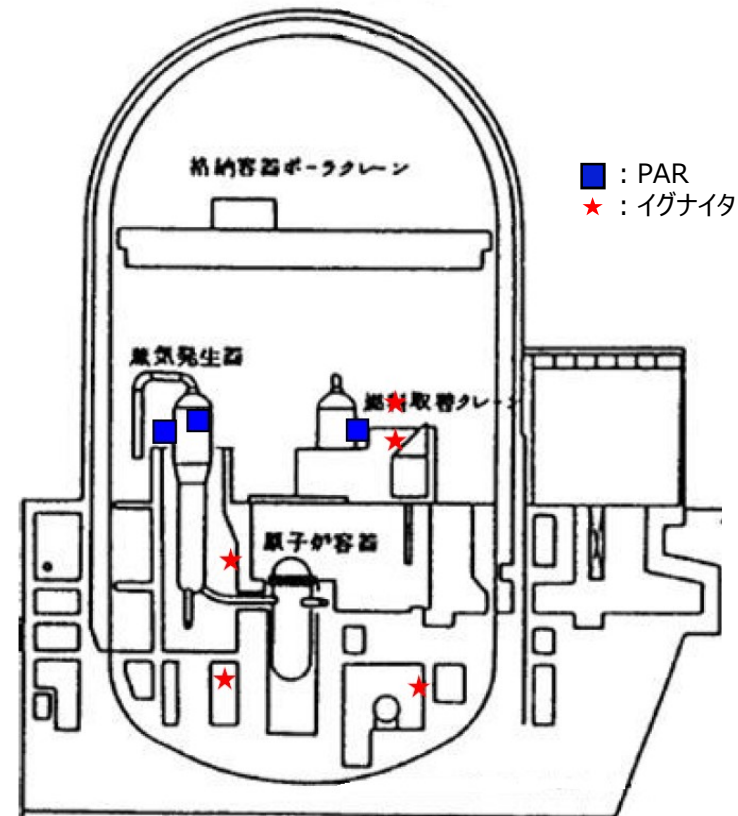
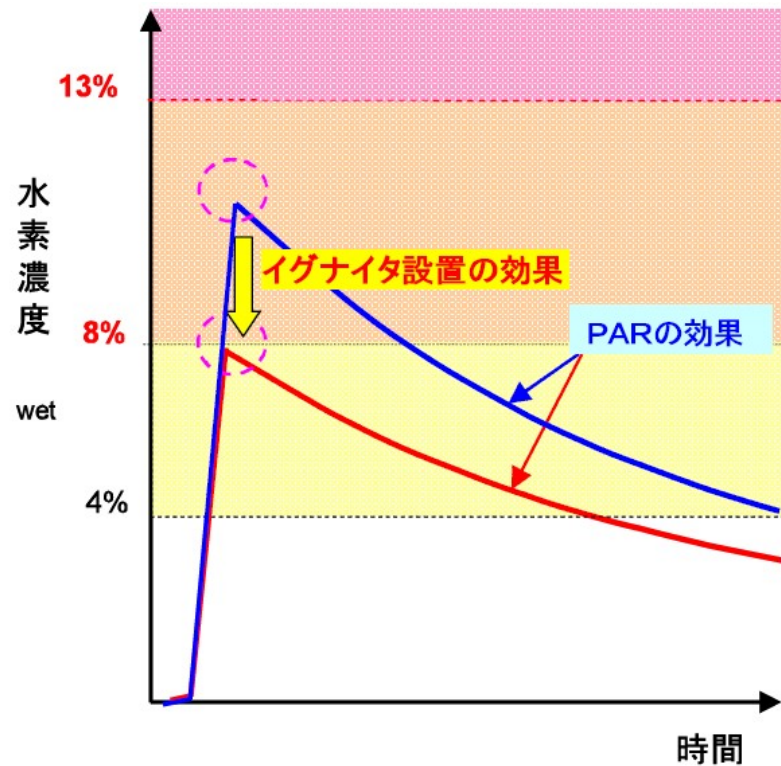
# 4. PWRにおける水素対策の概要(4/4)

事象初期：主にイグナイタで水素処理  
長期：主にPARで水素処理



イグナイタとPARの  
設置台数を合理化

(例) 代表3ループプラント設置例

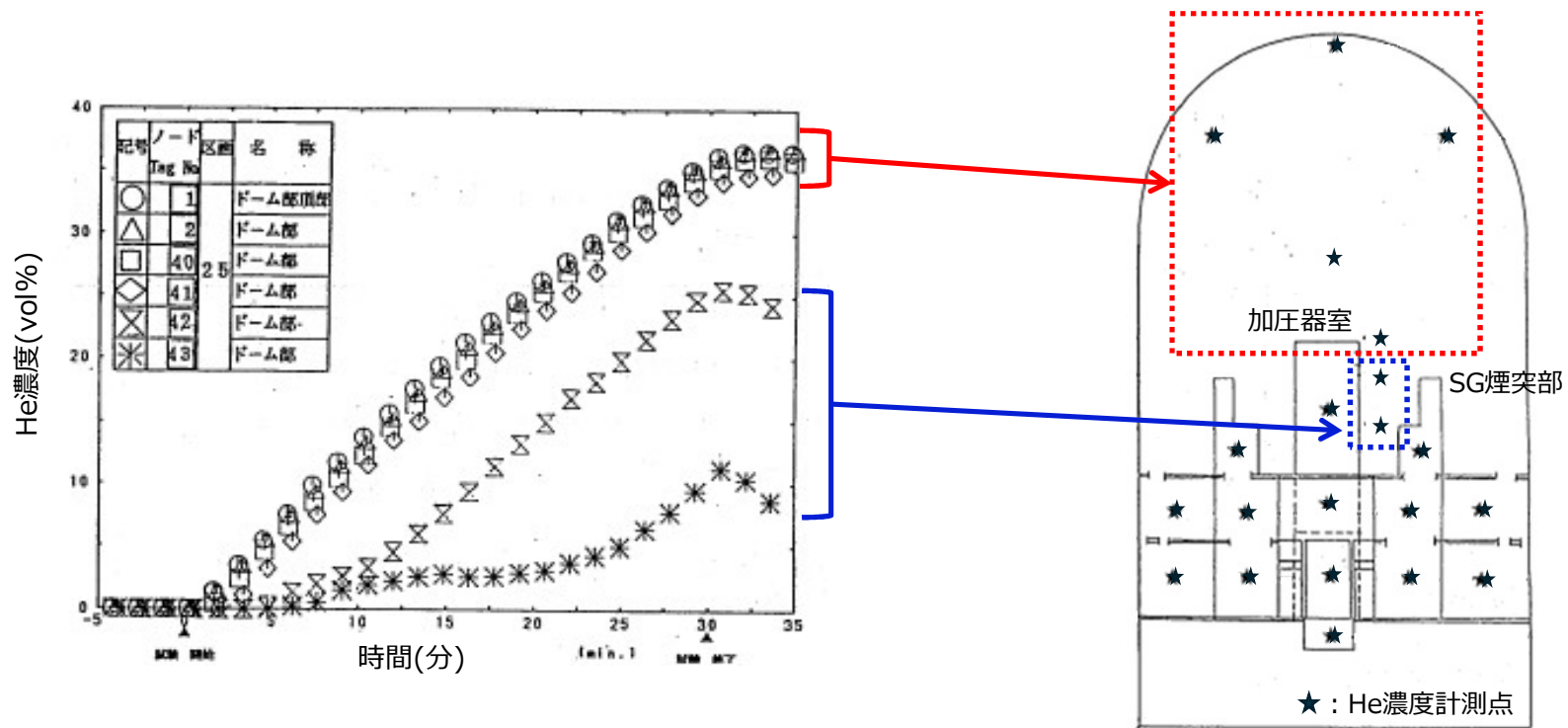


## CV内の水素濃度均一化について

### 格納容器ドーム部での水素成層化が議論となった

#### NUPEC可燃ガス濃度分布・混合挙動試験

多数の試験ケースのうち、1ケースのみドーム部で成層化が発生  
(M-8-1ケース(加圧器気相部破断、CVスプレイ不作動の想定))



### 事業者側の見解

- CV内ではCVスプレイ、蒸気流等により大きな循環流が形成される。
- NUPEC可燃性ガス濃度分布・混合拳動試験のM-8-1では、CV外は断熱条件であり、蒸気によりドームの上部壁が温められ、下部との温度差が発生し、対流効果が期待できなくなった。一方、実機はNUPEC試験と比べて相対的にヒートシンクが多く、CV外への放熱が期待できるため、ドーム部のみ温度上昇することはない。
- GOTHICコードによるCVスプレイ停止を想定した実機解析を行い、ドーム部で成層化が生じないことを確認した。
- 安全性向上の観点から、万一、水素成層化した場合にも対処できるよう、**ドーム部頂部にイグナイタを追設**する。

### ドーム部での水素成層化の議論における課題

#### 物理メカニズムが複雑で、数値解析の再現が困難な現象における不確かさの取り扱い

##### ➤ 複雑な物理メカニズム

蒸気発生、ヒートシンクによる冷却（凝縮含む）、気相混合、流動等が相互に影響を与える

##### ➤ 数値解析の再現

- 真値の同定が困難  
試験測定点が少ない／参照する試験がない
- 高い数値解析技術が必要  
非常に詳細なメッシュが要求される／流動モデルによる感度が大きい

不確かさの  
設定が困難

⇒ 本議論においては、不確かさを同定できないため最も保守的な対応をとることとした

(極論すれば“混ざる”or“混ざらない”の二択)

### 「実用発電用原子炉に係る炉心損傷防止対策及び格納容器破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド」

有効性評価に係る標準評価手法：

最適評価手法 + **不確かさの考慮** (不確かさが大きい場合)



**設備設計に多大な影響を及ぼす**

**不確かさの同定が困難な現象を含む事故シーケンスに対して、安全評価上、どのように対応するか、今後議論する必要がある**

### 他事例

#### ●MCCIの不確かさ

ウェットキャビティでの溶融炉心の拡がり挙動に不確かさがあり、保守的に溶融炉心あまり拡がらない条件での感度確認を行った

#### ●アニュラス内での水素濃度評価

CVからの漏えいによるアニュラス内の水素濃度評価に加え、水素の金属透過による影響も考慮しても、アニュラス空気浄化系設備（ファン）の作動によって排気され、可燃濃度に至らないことを確認した

**MOVE THE WORLD FORWARD**

**MITSUBISHI  
HEAVY  
INDUSTRIES  
GROUP**