

平成27年(ラ)第33号

川内原発稼働等差止仮処分命令申立却下決定に対する抗告事件

即時抗告申立補充書・その23

—滝谷・意見書(甲229)に基づく水素爆発の危険性—

平成28年1月15日

福岡高等裁判所宮崎支部 御中

抗告人ら訴訟代理人

弁護士 森 雅 美

同 板 井 優

同 後 藤 好 成

同 白 鳥 努  
外

## 第1 はじめに

### 1 格納容器の機能喪失

環境中への放射性物質の放出を防止する最後の防壁は、格納容器である。したがって、格納容器が機能喪失する危険性がある場合は、具体的危険性が認められる。

格納容器の破壊の要因としてまず挙げられるのは、福島原発事故で起きた格納容器内部の圧力・温度の比較的ゆっくりした上昇と、極めて急激な爆発的上昇である。後者の原因の主なものは、水蒸気爆発や水素爆発である。格納容器の機能喪失のシナリオは多数あるが、事故の早期に格納容器が爆発現象に伴って破壊する水蒸気爆発や水素爆発の危険性は確実に避けるべきである。

なぜなら、格納容器が破壊してしまうと、放射性物質の拡散を防ぐ方法がなくなり、福島原発事故をはるかに凌ぐ規模の事故になる危険性が認められるからである。

なお、水蒸気爆発の危険性については補充書18で主張したので、本書面では、滝谷紘一氏の意見書(甲229)に基づいて、水素爆発の危険性について論じる。

### 2 福島原発事故で明らかになった水素爆発の危険性

福島原発事故において、水素爆発によって幾つもの原子炉建屋が破壊されたことに伴い、大量の放射性物質が広範囲にまき散らされたことは、我々の記憶に新しい。

川内1・2号機はいずれも加圧水型炉(PWR)であり、沸騰水型(BWR)の福島第一原発と型式は異なるが、過酷事故時に原子炉内及び原子炉外で大量の水素が発生する危険性がある点においては全く同じである。

BWRでは、事故時に格納容器内での水素爆発を防ぐ対策として、通常運転中の格納容器内の雰囲気を実験室に替えて窒素を封入して酸欠状態にしているため、水素爆発が生じるおそれのある場所は、格納容器内でなくて、水素が格納容器のフランジの貫通部や電気配線貫通部から流出してくる空気雰囲気の原子炉建屋内になる。

他方、PWRでは、通常運転中の格納容器内は空気なので、水素爆発が格納容器内で生じるおそれがあり、大規模な水素爆発の場合、格納容器が損壊してしまう。この場合、福島原発事故における原子炉建屋内での水素爆発とは比較にならないほど大量の放射性物質が大気中に放出されることになる。

### 3 被控告人の過酷事故対策のシナリオについて

現在、原子力規制委員会において、原発の再稼働に向けて新規規制基準での適合性審査が進められており、設置変更許可申請書が合格とされたのは、被控告人の川内原発1・2号機その他、四国電力の伊方原発3号機や高浜原発3・4号機である。

上記各原発はいずれもPWRであるが、PWRにおいて、多重故障により原子炉の冷却機能が喪失し炉心溶融が懸念される事態になった時、炉心への注水はあきらめ、重大事故対策用の格納容器スプレイで格納容器内に水を散布して格納容器を冷却する手順が示されている。

冷却に失敗して炉心溶融が発生すると、最短では事故発生から1時間半程度で原子炉圧力容器が溶融貫通する。

その間に、格納容器スプレイ水が周囲の流路から格納容器下部キャビティに流入して深さ約1.3mのプールを作り、原子炉圧力容器底部を貫通して格納容器底部に落下する溶融核燃料をそのプール内で冷却するというのが、被控告人を含む上記各電力会社の設置変更許可申請書における過酷事故対策のシナリオである。

### 4 被控告人のシナリオが水蒸気爆発及び水素爆発の危険性・福島原発事故の教訓を無視していること

しかしながら、そのようなシナリオでは、川内1・2号機のいずれの原子炉においても、過酷事故の際には水素爆発が発生する危険性が高く、過酷事故対策としてはいわば自殺行為に等しい。

上記のとおり、福島原発事故によって水素爆発の危険性が明らかになり、それらの教訓を得たはずであるのに、被控告人は、過酷事故対策として、それらの教訓を無視するかのごときシナリオを描いて、川内原発の再稼働を行った。

また、以下に述べるように、被控告人の描くシナリオでは、過酷事故の際に、水素爆発が発生して、より大規模な事故に発展する危険性が高いことが科学的にも指摘されている。

にもかかわらず、被控告人は川内原発を再稼働させているのであり、福島原発事故と同様な、あるいはそれ以上の原発事故を再び引き起こす事態にもなりかねない。

## 第2 水素爆発の危険性について

### 1 水素爆発とは

#### (1) 過酷事故時の水素発生要因について

原子炉の冷却機能喪失状態が続くと、炉心燃料の温度が上昇して、燃料が溶融する。このような過酷事故の際に、水素が発生する要因として、以下のアないしエの4つが挙げられる。

#### ア ジルコニウム－水反応

燃料被覆管材料の主成分であるジルコニウム（Zr）は、高温になると、水（H<sub>2</sub>O）と化学反応して水素を発生させる。

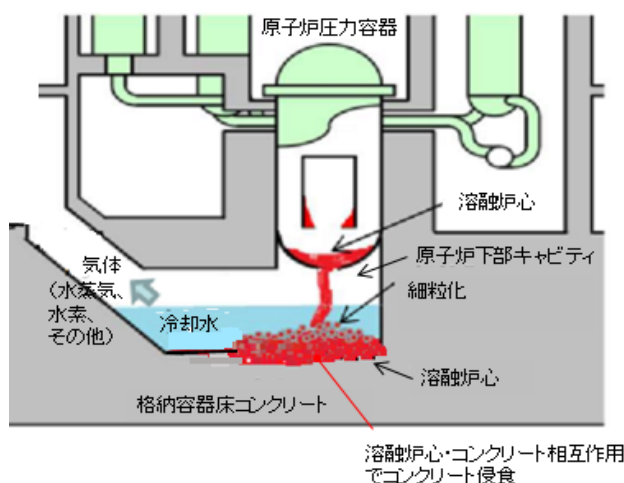


この反応は、ジルコニウムの温度が1200K（絶対温度。摂氏で927℃）程度から顕著になり、1500K（1227℃）以上で急激に進む。

#### イ 溶融炉心・コンクリート相互作用

溶融炉心が原子力圧力容器の破損箇所から落下して格納容器内の床や壁のコンクリートと接触すると、コンクリートが熱分解により侵食される。これに伴い、水分と炭酸ガスが発生する。これらが溶融炉心に含まれるジルコニウムなどの金属成分と接すると、酸化・還元反応により水素と一酸化炭素が発生する。なお、この相互作用は、落下する溶融炉心の量、周囲の水量など様々な要因が関係するきわめて複雑な現象であり、国内外を通じての実験研究などの数が限られており、実機規模での現象が十分に把握、解明されるには至っていない。

このような実情から、MCCIの進行を定量的に評価するために使用される解析コードもまだ未成熟であり、その解析結果には大きな不確かさ（誤差幅）を伴っている（下記は溶融炉心・コンクリート相互作用の説明図。甲229・17頁の図2）。



## ウ 水の放射線分解

放射線エネルギーにより水が分解して水素が発生する。

## エ ジルコニウム以外の金属－水反応

構造材に含まれる亜鉛、アルミニウム、鉄などの金属が高温の水や水蒸気と接すると、水素が発生する。

これらア～エのうち、事故発生直後から水素発生量が最も多いのがアのジルコニウム－水反応であり、次いで、イの MCCI である。

これらに比べると、ウ、エによる水素発生はかなり少ないので、以下では、アとイに着目して論じる。

## (2) 水素の爆発現象について

水素は、空気雰囲気中で酸素と反応して熱を出す。

この反応形態は反応速度に応じて、次のように分類される。

反応速度が遅い—燃焼

早い—爆発—爆燃（火炎の伝播速度が亜音速）

└爆轟（火炎の伝播速度が超音速・衝撃圧）

福島原発事故で生じた爆発現象は、このうち「爆轟」である。

構造物や建物の壊滅的破損を避けるためには、強烈な圧力を発生する爆轟の防止が必須となる。

新規規制基準では、「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」を求め、その判断基準は、「原子炉格納容器内の水素濃度がドライ条件（水蒸気存在を除外して算定すること）に換算して13%以下又は酸素濃度が5%以下であること」としている。川内1・2号機のような PWR では、水素濃度13%以下が爆轟防止の判断基準となる（以上甲229・4～6頁「2. 水素の発生と爆発現象について」参照）。

## 2 PWR で水素爆発が発生した場合の結果について

### (1) 福島原発事故の場合

福島原発事故では、事故の過程において、1号機、3号機及び4号機の原子炉建屋内で大規模な水蒸気爆発による建物破壊が生じ、大量の放射性物質が大気中に放出された（甲280・15頁、甲281・20頁の写真参照）。

### (2) PWR では格納容器が損壊するおそれがあること

高浜3・4号機及び大飯3・4号機は、いずれも PWR であり、BWR の福島第一原発とは型式が異なるが、過酷事故時に原子炉内及び原子炉外で大量の水素が発生する危険性がある点においては全く同じである。

それどころか、BWRでは、事故時に格納容器内での水素爆発を防ぐ対策として、通常運転中の格納容器内の雰囲気（空気）を空気に替えて窒素を封入して酸欠状態にしているため、水素爆発の生じるおそれのある場所は、格納容器内ではなくて、水素が格納容器の破損部から流出してくる空気（格納容器内の原子炉建屋）となる。他方で、高浜3・4号機及び大飯3・4号機のPWRでは、通常運転中の格納容器内は空気なので、水素爆発が格納容器内で生じるおそれがある。その場合、PWRでは、格納容器が損壊して、（福島原発事故のような）原子炉建屋内での水素爆発とは比較にならないほどの大量の放射性物質が大気中に放出されることになる。

### (3) 放出が予想されるヨウ素とセシウムの量

どれほどの量が放出されるかについては、高浜3・4号機ないしは大飯3・4号機のいずれか1基で過酷事故発生後の2時間程度以内の早期に格納容器損壊が生じると、ヨウ素とセシウム-137の炉内蓄積量（高浜3・4号機ではそれぞれ約24、100PBq、約270PBq、大飯3・4号機ではそれぞれ約31、000PBq、約430PBq）のうち大半が大気中に放出される。これに対して、福島原発事故で大気中に放出されたヨウ素とセシウムの総量はそれぞれ500PBq、10PBqとされている。そのため、ヨウ素、セシウムともに福島原発事故を一桁以上も上回るおそれがある。

### (4) 小括

したがって、高浜3・4号機及び大飯3・4号機において、格納容器内での水素爆発を確実に防止する対策をとることは、過酷事故時に住民の安全を守る上できわめて重要である（以上甲280、281・2～3頁「1. はじめに」）。

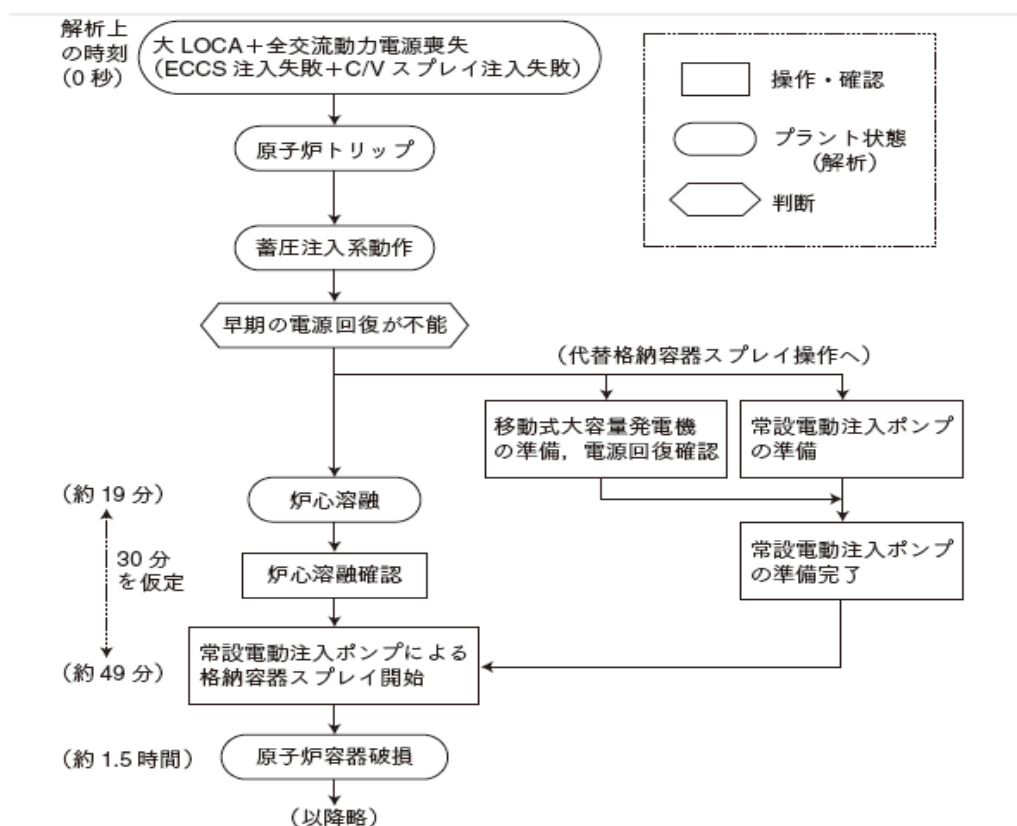
## 3 格納容器内での水素爆発防止対策

### (1) 過酷事故時に想定されるシナリオについて

川内1・2号機において、被控訴人の設置変更許可申請書では、過酷事故の代表事故として、「大破断LOCA（冷却材喪失事故）+ECCS（非常用炉心冷却設備）注入失敗+格納容器スプレイ注入失敗+全交流電源喪失」を想定して、対応を策定している。

このような過酷事故では、事故発生後、解析では約19分というごく短期間のうちにそれぞれ炉心溶融に至り、約1.5時間後に、原子炉圧力容器下部の破損に伴い、溶融炉心が原子炉下部キャビティに落下し始める（甲229・6頁）。

格納容器過圧破損事故対策手順の概要（甲 2 2 9 ・ 1 8 頁の図 3）



(2) 格納容器内での水素爆発防止対策について

川内 1 ・ 2 号機での格納容器内での水素爆発防止対策は、以下の 3 種類である(甲 2 2 9 ・ 6 頁～ 7 頁)。

ア 原子炉下部キャビティの水張り

原子炉圧力容器の破損箇所から溶融炉心が落下し始めるまでに、格納容器スプレイを作動させて原子炉下部キャビティを十分な水位まで水張りする。

それにより、溶融炉心を冷却することにより、MCCI（溶融炉心・コンクリート相互作用）によるコンクリート侵食の進行と水素発生量を抑制する。

ただし、MCCI の抑制対策としてのこの水張り方式には、高温の溶融炉心が水中に落下する際に「水蒸気爆発」が生じるリスクがあることについては、既に述べたとおりである。なお、このリスクをなくすとともに溶融炉心とコンクリートの接触を避けるために、フランスとロシアの新型炉では、原子炉圧力容器外に「コア・キャッチャー」を設置する方式を採用している。

## イ 静的触媒式水素再結合装置の設置

これは、白金系金属の触媒を用いて、水素と酸素を結合させるものである。

5基設置することにされているが、その処理能力からいって、炉心溶融時に大量に発生する可能性の高い水素を短時間に処理することはできず、長期的に徐々に除去する目的で設置されている。

## ウ イグナイタの設置

イグナイタ（水素燃焼装置）は、電気ヒータに通電して水素を燃焼させるもので、11基設置される。

もっとも、機能の信頼性が十分ではないこともあって、水素爆発対策の有効性評価においては、このイグナイタを考慮に入れていない（甲229・7頁の(3)参照）。

## 4 水素爆発防止対策の審査ガイド

原子力規制委員会は、「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」において、主要解析条件を「3.2.3 (4) 水素燃焼」の箇所で、概ね、以下のとおり定めている（甲229・8頁参照）。

- 「(a) 炉心内の金属－水反応による水素発生量は、原子炉圧力容器の下部が破損するまでに、全炉心内のジルコニウム量の75%が水と反応するものとする。
- (b) 原子炉圧力容器の下部の破損後は、溶融炉心・コンクリート相互作用による可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガス等の発生を考慮する。」

## 5 被控告人の水素濃度の解析評価結果の検証

### (1) 基本解析

ア 被控告人を含む電力会社各社は、PWR 再稼働のための審査申請において、炉心溶融と原子炉圧力容器破損に伴う格納容器内の水素濃度の時間的变化を、解析コード MAAP（過酷事故時のプラント内の様々な物理量の時間的推移をコンピュータでシミュレーション計算するソフトウェア〔＝解析コード〕の名称であり、米国の電力中央研究所が所有している。）を使用して解析評価している（甲229・8頁～9頁）。

この解析ケースを便宜上「基本解析」と呼び、不確かさの影響を評価する後述の解析と区別する。

イ 被控告人は、水素爆発防止対策の有効性を評価するための事故想定として、「大破断 LOCA+ECCS 注入失敗」を選定しているが、被控告人



は、上記7頁の図3での想定と比べて、格納容器スプレイ注入を最初から考慮に入れているのは、水蒸気が早く凝縮して水素濃度の上昇が厳しくなるためとしている。

格納容器内の水素濃度は、原子炉压力容器破損部から炉内でのジルコニウム-水反応による水素の流出がほぼ終わる約3時間の間に急増し、その後は静的触媒式水素再結合装置の働きで緩やかに減少していく。

水素濃度の最大値は約9.7%であり、格納容器破損防止対策の評価項目である水素爆轟防止の判断基準値13%を下回っている。

ウ ここで留意すべきは、この基本解析では、上記4の審査ガイドの主要解析条件(a)に従って、「原子炉压力容器の下部が破損するまでに、全炉心内のジルコニウム量の75%が水と反応して水素を発生する」としていることである。

そこには、上記4の主要解析条件(b)にある「原子炉压力容器の下部の破損後は、熔融炉心・コンクリート相互作用による可燃性ガス及びその他の非凝縮性ガス等の発生を考慮する」については、考慮されていない。

その理由として、被抗告人は、格納容器スプレイ注水により原子炉下部キャビティには熔融炉心が落下する時点において十分な水量が確保されており、熔融炉心の崩壊熱を除去するので、床コンクリートには有意な侵食は発生しないことから、それに伴う有意な量の水素発生はない、としている。

しかし、この熔融炉心・コンクリート相互作用に伴う有意な量の水素発生がない、としていることに問題があり、この点を以下に論じる。

## (2) 熔融炉心・コンクリート相互作用の不確かさを考慮した解析

被抗告人は、解析コードMAAPを用いて熔融炉心・コンクリート相互作用(MCCI)の評価を行い、基本解析では、「熔融炉心による格納容器床のコンクリートの侵食はない」ので、相互作用に伴う水素発生は無視し、ジルコニウム反応量を全炉心存在量の75%として水素濃度を求めている。

しかし、熔融炉心・コンクリート相互作用に関するMAAPの解析精度について、水のないドライ条件での実験データにもとづく検証はされているが、水中での実験データによる検証はされていない。

しかも、水中では相互作用が「始まったら全部止まる」という極端に過小評価する特性のある解析モデルを組み込んでいる。

規制委員会は、川内1・2号機の適合性審査において、知見が少ない熔融燃料挙動について、不確かさに対する検討が不足している点を指摘し、熔融炉心・コンクリート相互作用の感度解析を踏まえた水素発生について検討す

ることを求めた。

これに関して、被抗告人の検討結果と規制委員会の判断が、後掲 15 頁の表 1 のとおり審査書に記載されている(後掲 14 頁の文献 7 の 196~198 頁)。

それによると、被抗告人は、解析コード MAAP に依存することなく、「全炉心内のジルコニウムが水と反応する」と仮定した場合の水素濃度の値は最大約 12.6%であり、爆轟防止基準の 13%以下を満足するとしている。

しかし、爆轟防止基準との差はわずか 0.4%程度しかなく、この評価において考慮されていない不確かさがあれば、13%を超えることが目に見えている。

そこで、次に、この被抗告人の評価で考慮されていない不確かさについて論じる。

### (3) ジルコニウム以外の金属と水の反応による水素量を考慮した評価

MCCI により発生する水素量の評価には大きな不確かさがあることについて、1980 年代から日本の過酷事故対策の研究開発の中核になっていた(財)原子力発電技術機構による事業報告書には、「炉外における熔融炉心-コンクリート反応や、ジルコニウム以外の金属の酸化も重要である。熔融炉心-コンクリート反応が終息せずに継続した場合には、ほかの金属の反応も含めて全炉心ジルコニウムの 100%を超える量が反応することもあり得る。」と記されている(甲 2 2 9・1 1 頁)。

従って、この知見を踏まえると、川内審査書において、「全炉内のジルコニウム量の 100%が水と反応する」とした仮定は、ほかの金属の反応を考慮していないので、完備性を欠いている。

ジルコニウム以外の金属で多量に存在するのが、制御棒被覆管(ステンレス鋼)と炉内構造物(炉心支持板、炉心支持柱、炉心バッフルなどの低合金鋼)に含まれる鉄である。

炉心全体にわたり燃料熔融(二酸化ウラン燃料の融点は約 2800℃)が起きるような高温状態では、制御棒と炉内構造物(融点 1400~1500℃)も溶けて熔融燃料と混じりあって熔融炉心を形成する。

この熔融炉心が原子炉压力容器内及び原子炉压力容器外で水と接すると、その中に含まれているジルコニウムと同様に鉄が酸化されて水素を発生する。

水中ではイオン化傾向の大きいジルコニウムが先行して反応するとされているが、ジルコニウムの反応が完了した後は鉄の反応が続く。

この鉄-水反応による水素量が、上記(2)で述べた被抗告人の不確かさの影響評価では考慮されていない。

滝谷紘一氏の算定では、炉心内の全ジルコニウム量(20200kg)に加えて鉄

が約 590kg 反応すると、水素濃度は約 12.6%より増えて 13%に達する(甲 2 2 9 ・ 1 1)。

### 鉄－水反応により水素濃度が 13%に達する鉄の重量の算出

- ・ 炉心内の全ジルコニウム (20200kg) の反応による水素発生量： 893kg
- ・ この場合の水素濃度： 12.6%
- ・ 水素濃度が 12.6%から 13%に増加するに要する追加の水素量は、
$$893 \cdot (13 - 12.6) / 12.6 = 28.3$$
$$\Rightarrow \text{約 } 28\text{kg (14kmol)}$$
- ・ これに相応する鉄の量は、鉄－水反応式  $3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2$  及び鉄の分子量 55.8 (kg/kmol)より、
$$55.8 \cdot (14 \cdot 3/4) = 586$$
$$\Rightarrow \text{約 } 590\text{kg}$$

下記の「制御棒被覆管ステンレス鋼の重量の算出」を見れば分かるように、制御棒被覆管のステンレス鋼だけでも全重量は約 510kg あり(甲 2 2 9 ・ 1 1 頁)、これに加えて炉内構造物の鉄の存在量も考慮すると、水と反応する可能性のある鉄の量が 590kg を大幅に超えることは明らかである。

### 制御棒被覆管ステンレス鋼の重量の算出

- ・ 制御棒クラスタ数 N1： 52
- ・ 制御棒本数 N2： 24 本/クラスタ当たり
- ・ 制御棒被覆管厚さ t： 約 0.5mm  
材料 ステンレス鋼
- ・ 制御棒吸収材直径 d： 約 8.7mm
- ・ 制御棒有効長さ L： 約 3.6m

(文献：設置許可申請書)

ステンレス鋼の比重量  $\gamma$  7820kg/m<sup>3</sup> を用いると、制御棒被覆管全重量 W は

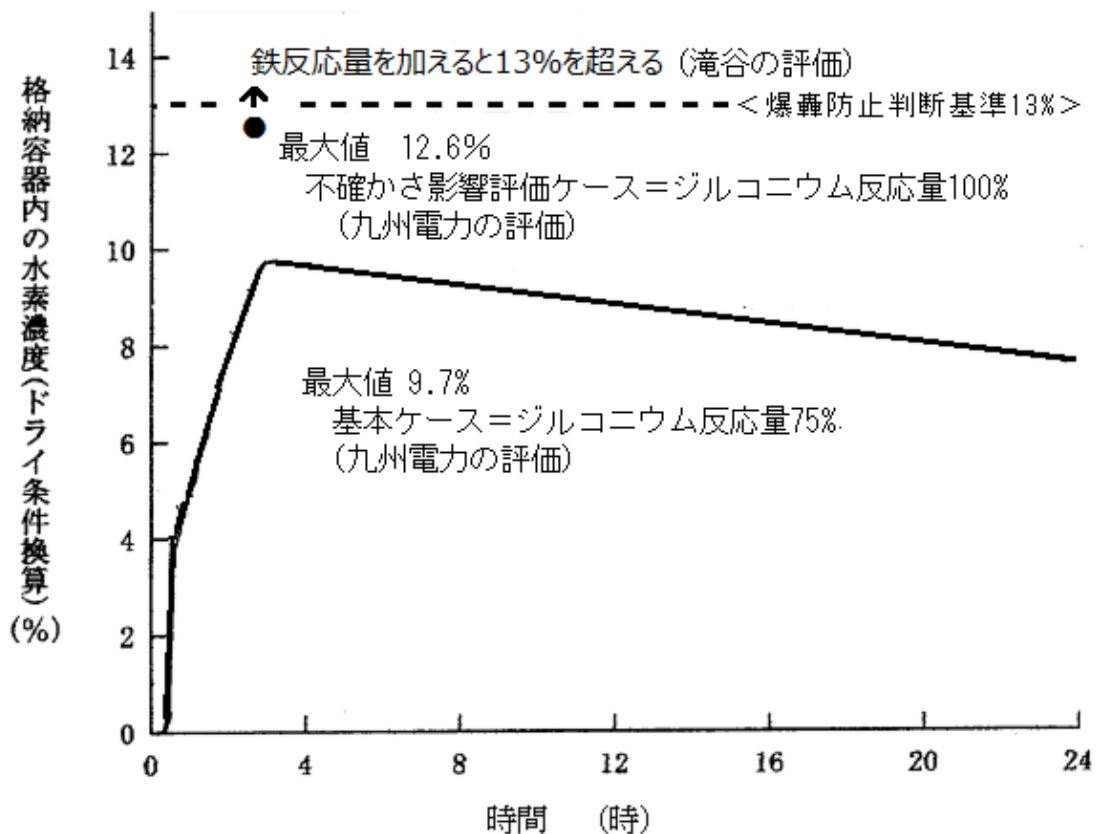
$$\begin{aligned} W &= \gamma \cdot \pi / 4 \cdot ((d+2t)^2 - d^2) \cdot L \cdot N1 \cdot N2 \\ &= 7820 \cdot \pi / 4 \cdot (0.0097^2 - 0.0087^2) \cdot 3.6 \cdot 24 \cdot 52 \\ &= 508 \text{ (kg)} \\ &\Rightarrow \text{約 } 510\text{kg} \end{aligned}$$

このことから、不確かさの影響評価として、ジルコニウム-水反応に加えて、鉄-水反応による水素発生量を考慮に入れると、水素濃度は爆轟防止判断基準の13%を超えると判断される(甲229・11頁～12頁)。

不確かさの影響評価の結果として得られた上述の水素濃度の数値を図で示すために、下記の図5の上部には、被抗告人による全ジルコニウム量が反応した場合の値約12.6%を、●印で示している。さらに、滝谷紘一氏による鉄の反応を考慮した場合の値の範囲を太い矢印で示している。

この表示は、水素爆轟防止判断基準の13%を超えることを意味している(甲229・12頁)。

図5 格納容器内水素濃度の時間変化(基本解析ケース)と不確かさ考慮解析ケースの最大値(甲229・20頁の図5)



以上のとおり、水素濃度に関する不確かさ影響評価として、鉄-水反応を考慮に入れると、格納容器内で水素爆轟が生じるおそれがある。

被抗告人の不確かさ影響評価で、鉄-水反応を考慮に入れていない理由は、それを考慮に入れると水素爆轟防止判断基準を満たすことができないから、

という恣意的判断があるのではないか、という強い疑念をもたざるを得ない。

## 6 まとめ

以上の通り、川内原発1・2号機の過酷事故時の水素の発生について、現象及び解析評価における不確かさの影響を厳しく評価する観点に立って、炉心内のジルコニウム-水反応に加えて鉄-水反応を考慮すると、格納容器内の平均水素濃度の最大値は、爆轟防止判断基準の13%を超えることが明らかである。

従って、過酷事故時に水素爆発による格納容器の損壊とそれに伴う放射性物質の大量放出という具体的危険性がある。

このような、危険で安全性が確保されていない原発の稼働を認めることは許されない。

以 上