

検証・川内原発審査書

加圧水型原発の溶融炉心・コンクリート相互作用と水素爆発に対する対策は新規規制基準に適合していない

滝谷紘一

たきたに こういち
元原子力安全委員会事務局技術参与、工学博士

原子力規制委員会が川内原発 1 号機および 2 号機に関する新規規制基準適合性を確認した審査書(2014 年 9 月 10 日許可)とその関連資料を検証したところ、新規規制基準への適合性審査を受けるために設置変更許可申請をした各加圧水型原発(PWR)の重大事故等対策のうち①溶融炉心・コンクリート相互作用の抑制対策は、運転員による手動操作開始時間の不確かさを考慮すると有効ではないこと、および②水素爆発の防止対策は、溶融炉心・コンクリート相互作用の解析評価における不確かさを考慮すると、水素爆発防止の判断基準を満足できないことが判明した。

PWR の新規規制基準への適合性審査が 2013 年 7 月以来実施されている中で、原子力規制委員会は九州電力川内原発 1 号機・2 号機(以下、川内 1・2 号機と記す)に関して 2014 年 9 月 10 日に新規規制基準に適合していると結論づけた審査書¹を確定した。

井野と筆者は本誌 2014 年 3 月号に「不確かさに満ちた過酷事故対策——新規規制基準適合性審査はこれでよいのか」と題して、当時審査中の PWR に関する問題点のいくつかを指摘した²。今回、筆者はそれらの問題点の取り扱いに焦点をあてて川内 1・2 号機の審査書とその関連資料を検証した。その結果、「原子炉格納容器の破損」を防止するための「溶融炉心・コンクリート相互作用^{*1}の抑制対策」および「水素爆発の防止対策」

について、運転員の手動操作および事象進展の解析評価における不確かさの影響を考慮に入れると、これらの対策はいずれも有効でなく、新規規制基準に適合していないことが定量的に明らかになった。これは、川内原発だけでなく他の多くの PWR にも共通している。

本論証に用いる資料は、規制委員会の川内 1・2 号機審査書、その関連資料としての審査書案に対するパブリックコメント募集で提出された意見への規制委員会の考え方³、その中で参照されている規制委員会の技術報告⁴、および川内 1・2 号機、関西電力高浜 3・4 号機、大飯 3・4 号機、四国電力伊方 3 号機、北海道電力泊 1・2 号機、3 号機の各原子炉設置変更許可申請書と審査会合提出資料である。

1 過酷事故シナリオと格納容器破損防止対策

PWR での過酷事故時の格納容器破損防止対策に関する事故対策シナリオとそれに対応する設備構成の概要については、前報²で玄海 3・4 号機を例にとり紹介した。川内 1・2 号機を含めて他の PWR でも基本的に同様の事故対策を採用することになっている。ここでは本論考を読みやすくするために、図 1 に川内 1・2 号機についての事故対策シナリオ概要と解析評価による主要事象の発生時間を示す。要点は次のとおりである。

①事故想定：大破断 LOCA(冷却材喪失事故) +

*1—MCCI(Molten Core-Concrete Interaction)とも呼ばれる。

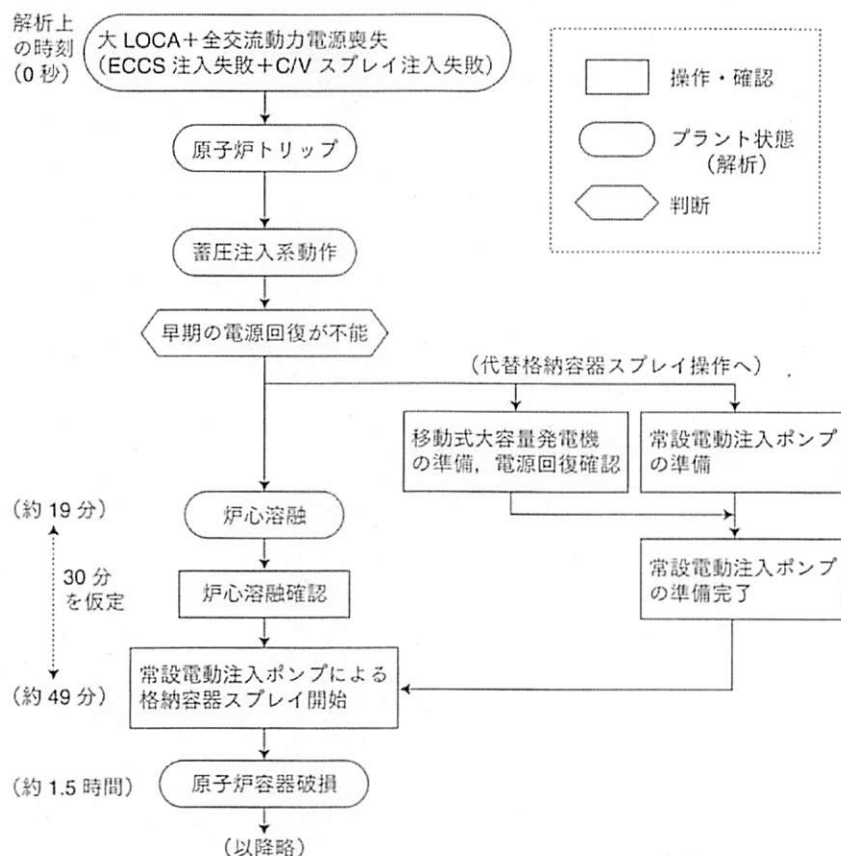


図1—格納容器の破損防止に関する事故対策シナリオの概要(大破断 LOCA+ECCS 注入失敗+格納容器スプレイ注入失敗。全交流動力電源喪失も想定)(川内1・2号機)

ECCS 注入失敗+格納容器スプレイ注水失敗 (全交流動力電源喪失も想定)

- ②(原子炉が自動トリップした後)運転員が早期の電源回復が不能と判断した場合、代替格納容器スプレイを行うために移動式大容量発電機と常設電動注入ポンプの準備をする。
- ③炉心溶融開始30分後(事故発生約49分後)に代替格納容器スプレイの手動操作により原子炉下部キャビティへの注水を開始する。
- ④原子炉圧力容器が破損して溶融炉心が原子炉下部キャビティに落下する時点(約1.5時間後)において原子炉下部キャビティ内の水量が十分に確保される(水位約1.3m)ことにより、溶融炉心の崩壊熱は除去されて、溶融炉心・コンクリート相互作用は抑制される。
- ⑤水素爆発の防止対策(図1には含まず)としては、静的触媒式水素再結合装置が格納容器内に常設される。この装置には動的機器はないこともあり、運転員操作は不要である。(この装置

の説明は3節で述べる。)

2 溶融炉心・コンクリート相互作用の抑制対策は有効でない

(1) 審査書での注水遅れの不確かさの扱い

格納容器の破損防止対策の有効性評価に関する審査ガイド⁵⁾には、「最適評価手法を適用する」「不確かさが大きいモデルを使用する場合又は検証されたモデルの適用範囲を超える場合には、感度解析結果等を基にその影響を適切に考慮すること」が定められている。したがって、有効性評価においては、不確かさの影響検討が重要性を帯びている。

溶融炉心・コンクリート相互作用の抑制対策の有効性評価において考慮すべき不確かさの一つに、前記②、③での代替格納容器スプレイ開始に関わる運転員の判断、現場移動、手動操作などに要する時間がある。各電力会社はこの時間を共通して

「炉心溶融開始後30分」として本対策の有効性評価を行っている。しかし、過酷事故という非常事態において30分という短時間でシナリオ通りに対応作業ができる保証がないことは、東京電力福島第一原発事故での対応実態の教訓からも周知のとおりである。

川内1・2号機の審査の過程において規制委員会は九州電力に対してこの原子炉下部キャビティへの注水遅れの影響の評価を求め、以下を確認したと審査書に記している。

「申請者は注水操作開始時間の余裕を把握するための感度解析^{*2}を実施し、操作開始が10分遅れても原子炉圧力容器破損時において約1mの原子炉下部キャビティ水位を確保できるという結果を得た。これにより、規制委員会は、溶融炉心・コンクリート相互作用の観点において、原子炉下部キャビティへの注水操作開始時間の遅れが評価結果に与える影響が小さいことを確認した。」(文献1の203~204頁)

ここで操作開始遅れ時間を10分間とした根拠については何も記されていない。感度解析結果として問題が出ないように恣意的に短く設定された可能性もあり、この妥当性に疑問がある。なぜならば、同じ事故シナリオに対して規制委員会が自ら別途実施した感度解析では、この時間を10分ではなくて35分を想定しているからである。このことについて次に詳述する。

(2) 「技術報告」での注水遅れの不確かさの扱い

(i) 基本ケースについて

2014年7月17日~8月15日の期間に審査書案に対して実施されたパブリックコメント募集において、溶融炉心・コンクリート相互作用に関するクロスチェック解析^{*3}を求める意見が提出され

*2—感度解析とは、解析モデルと解析条件等における不確かさの影響を検討するために、着目する入力データの値を基本ケースから変えて解析することを指す。

*3—申請者の使用した解析コードとは異なる解析コードを用いて規制委員会自ら同じ解析条件で解析し、申請者の解析結果の妥当性を厳正に評価すること。

た。この意見に対して、規制委員会は「不確かさが大きいと予想されるMAAP^{*4}の解析結果については、規制委員会がMELCOR^{*5}による解析を実施しており、MAAP解析結果と同様の傾向を確認しています。MELCORを用いた解析事例はNRA^{*6}技術報告2014-2001(以下「技術報告」と記す)で公開しています。」と回答している(文献3の35頁)。

ここで引用されている「技術報告」⁴はパブリックコメントの募集開始前ではなくて、募集期間も終わりに近い2014年8月7日になって公開された。その前書きには、「格納容器破損防止対策に影響を与える重要な物理化学現象及び不確かさ要因を同定し、感度解析によりその影響を検討した。」と記されている。その本文該当箇所を筆者は検証した。その結果、川内1・2号機の代替格納容器スプレイ手動操作による注水対策について、注水遅れの不確かさを考慮に入れると有効性があるとは認められないことが判明した。その検証経過を以下に説明する。

「技術報告」には、3ループPWRプラント^{*7}を対象としたMELCORによる解析結果が記されており、この解析結果と川内1・2号機に関するMAAPの解析結果を照らし合わせる。

最初に、注水遅れがない基本ケース^{*8}についてのMAAPとMELCORによる主な事象の発生時間の比較を表1に示す。この表から次の点が指摘される。

- ①炉心溶融の開始はMAAPが約19分、MELCORが25分。原子炉圧力容器破損(格納容器内へ溶融炉心が落下し始める)はMAAPが約1.5時

*4—PWR各社が使用している過酷事故解析コードの名称。

*5—規制委員会が使用している過酷事故解析コードの名称。

*6—原子力規制委員会の英名Nuclear Regulation Authorityの略語。

*7—旧原子力発電技術機構および旧原子力安全基盤機構が安全研究用として整備した3ループPWRプラントを指す。特定のプラントを対象としたものではない、とされている。なお、川内1・2号機は3ループプラントであり、ここでの比較検証の対象となるものである。

*8—ここでは原子炉設置変更許可申請書「添付書類十」に記載の解析ケースを指す。

表 1—大破断 LOCA + ECCS 機能喪失(全交流動力電源喪失を想定)における主な事象の発生時間(基本ケース) : MAAP と MELCOR による解析結果の比較

解析コード (実施者/対象プラント)事象	MAAP (九州電力/川内 1・2)	MELCOR (規制委員会/3 ループ PWR プラント)	備考
炉心溶融開始	約 19 分	25 分	
代替格納容器スプレイ開始	約 49 分	55 分	運転員操作対応時間として炉心溶融開始後 30 分を仮定
原子炉圧力容器破損	約 1.5 時間	1.2 時間	溶融炉心が落下開始
原子炉圧力容器破損までの 原子炉下部キャビティの ・注水時間 ・水位	約 41 分 約 1.3 m	17 分 約 0.5 m(*)	原子炉圧力容器破損時間とスプレイ開始時間の差 (*)注水時間比例で求めた筆者推算値

間(90分), MELCOR が 1.2 時間(72分)であり、両解析コード間で有意な相違がある。規制委員会は MAAP と MELCOR の解析結果の定量的比較評価をしておらず、したがってこの相違が何に起因するのか論じていない。(筆者はどちらの解析コードがより精度が高いかの知見を有しておらず、ここでは両方の解析モデルそれぞれに含まれる不確かさに由来するものと見なし、厳正な安全評価においては両方の解析結果のうち厳しいほうの値を採用すべきであると考える。)

②注水により溶融炉心・コンクリート相互作用を抑制する上で重要な値である溶融炉心落下開始までの注水時間(注水開始から原子炉圧力容器破損までの経過時間)については、MAAP 値約 41 分は MELCOR 値 17 分の約 2.4 倍と大幅に長い。したがって、溶融炉心・コンクリート相互作用の評価における注水時間について MAAP は MELCOR より非安全側の結果を与える。

③MELCOR による解析では、原子炉下部キャビティの水位と溶融炉心・コンクリート相互作用現象については、後出④のとおり検討対象から除外しているため、原子炉圧力容器破損時点での水位は不明である。そこで筆者が推算すると、MELCOR 解析結果に対応する水位は約 0.5 m である*9。MAAP 解析では、

約 1.3 m の水位が確保された場合の溶融炉心・コンクリート相互作用による床コンクリート侵食は約 3 mm で、有意ではないと評価しているが、水位が約 0.5 m のように十分に確保されているとは言えない場合の評価はなされていない。

規制委員会は、解析コードの違いからくる注水時間の不確かさの影響を検討するために、MELCOR 解析に対応する水位約 0.5 m の場合の溶融炉心・コンクリート相互作用の解析評価を九州電力に対して求めて、その結果を審査に反映すべきであった。それを求めることなく川内 1・2 号機が新規基準に適合しているとしたことは、審査の不徹底さを示すものである。

④「技術報告」には、溶融炉心・コンクリート相互作用の評価に関して、「コンクリート侵食の発生と継続の可能性を検討するためには、主として既往の試験結果等に基づき不確かさ要因を同定した上で、その影響を含めた評価を行うことが妥当である。上述のように(中略)既往の試験結果等に基づく不確かさを勘案した評価を行うことが妥当であることから、本技術報告の検討対象からは除外した。」(文献 4 の 3 頁)と記され、MELCOR による原子炉下部キャビティに溜まる水量、水位および溶融炉心・コンクリート相互作用の進展現象の解析は除外扱いされている。

*9—②の注水時間と MAAP 値約 1.3 m から比例算出。

したがって、パブリックコメントでの溶融炉心・コンクリート相互作用のクロスチェック解析を求める意見に対して「規制委員会が MELCOR による解析を実施しており、MAAP 解析結果と同様の傾向を確認しています。」という規制委員会の回答(前出)は、明らかに事実と反しており、規制委員会はこの回答を訂正すべきである。

さらに、「同様の傾向を確認しています」は、(溶融炉心・コンクリート相互作用を除外したとしても、相互作用開始に至るまでの)解析した一連の事象進展について定性的にしか比較評価をしていないことを意味している。定量的な比較評

コラム 1

溶融炉心・コンクリート相互作用(MCCI)に関する解析コード MELCOR と MAAP の相反する特性について

川内原発審査審査部が確定された翌々週、2014年9月24日の原子力規制委員会定例記者会見で、プラント関係審査を担当する更田豊志委員長代理が解析コードの MELCOR と MAAP の重要な特性差について注目すべき説明をした。(以下「」内は規制委員会ホームページ掲載の記者会見録の転載。)

「MCCI に関して言うと、MCCI は極めて特殊な現象で、というのは、代表的なシビアアクシデント解析コードの中で MCCI に対する解析結果というのは極めて大きく割れる、不確かさの大きな現象です。例えば、事業者が用いている MAAP(モジュール事故解析プログラム)という解析コードの中では、デコンプというモジュールが使われていますけれども、デコンプでは、MCCI というのは、ごくざっくり言うと、始まったら全部止まるというような解析結果を与えます。一方、NRC が作成した MELCOR という解析コードにはコルコンというモジュールが入っていますけれども、コルコンで解析すると、一旦始まると終わらないという解析結果を与えます。これはシビアアクシデントの解析を行っている技術者、研究者の間では定説ではありますけれども、どちらも両極端の結果を与えるので、実際問題としては、MCCI につい

価をするのでなければ本来の意味でのクロスチェック解析ではない。この点も安全審査として科学的・技術的厳正さを欠いている証左として指摘する。

(なお、溶融炉心・コンクリート相互作用の現象解析について、MELCOR と MAAP のどちらにも大きな問題があることが、審査書確定後の規制委員会記者会見の場で明らかにされた。コラム 1 参照。)

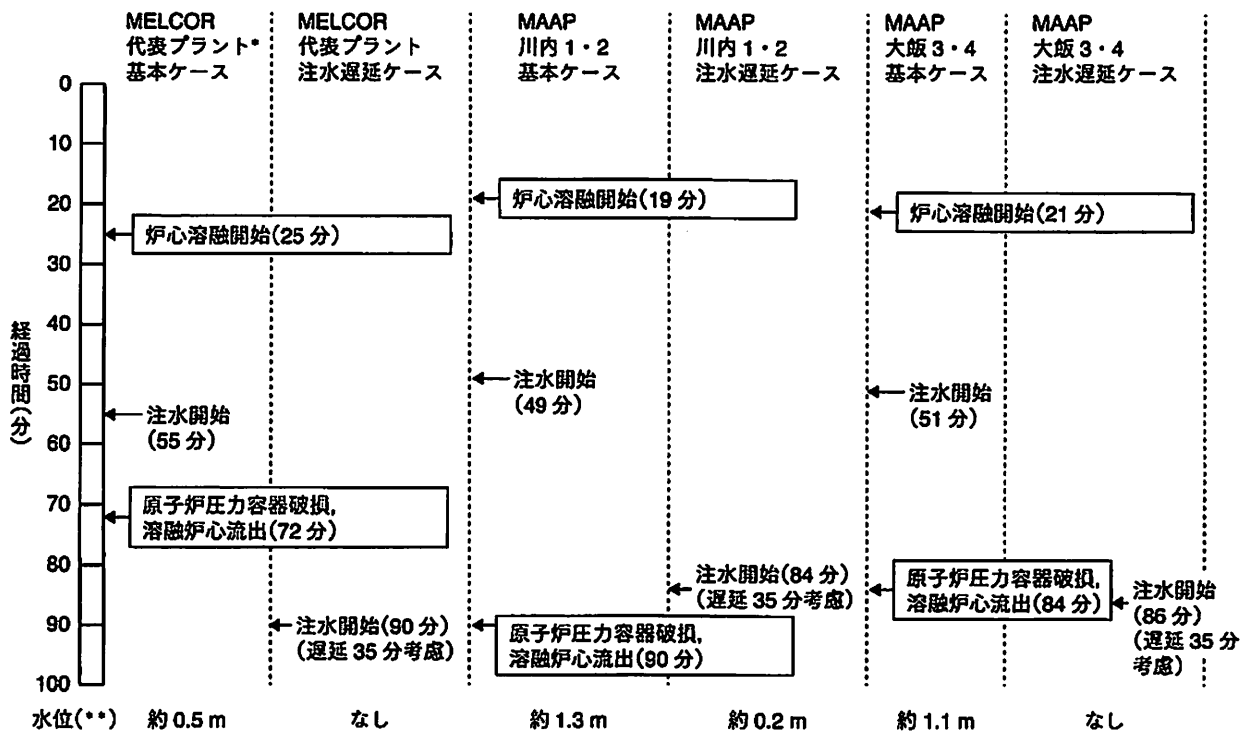
(ii) 注水開始時間の不確かさの影響評価について

「技術報告」では、MELCOR を用いた代替格納容器スプレイの手動操作に関する感度解析とし

ては工学的判断に基づいて判断を下すのが状況であって、解析コードの成熟度が MCCI を取り扱うようなレベルに達しているという判断にはありません。]

規制委員会の「技術報告」で、MELCOR を使った溶融炉心・コンクリート相互作用の解析を除外した背景がここにあることが察せられる。すなわち、MELCOR で解析すると相互作用が「一旦始まると終わらない」、一方、MAAP での解析では「始まったら全部止まる」ので、両解析結果を付き合わせると、MAAP 解析結果を妥当と評価することができなくなるのである。

更田規制委員長代理が MAAP も MCCI を取り扱うようなレベルの成熟度に達していないと判断しているにもかかわらず、その MAAP による解析結果を用いて MCCI 対策が有効であるとする九州電力の説明を規制委員会が受け入れたことは、論理的に筋が通っていない。また「工学的判断に基づいて」という表現は、通常は科学的・技術的な根拠や裏付けデータがないか極めて乏しい場合に用いられることが多い。原発の審査における重要な判断において、そのようなことがあってはならない。本当のところは、MCCI については審査を行うに必要な成熟した科学的・技術的レベルに規制委員会自体が達していないということであり、現段階で溶融炉心・コンクリート相互作用に関する審査は不可能なのである。



(注記) *3 ループ PWR プラントのこと
 **原子炉压力容器破損時点での原子炉下部キャビティの水位。MAAP 基本ケース以外は筆者推計(注水を対象とし注水よりも少量である LOCA 流出水は無視)

図2—主要事象の発生時間と原子炉下部キャビティの水位：MELCOR と MAAP による基本ケースと注水遅延ケースの解析値

て、注水開始時間を基本ケースでは事故後 55 分のところを 1.5 時間(90分)にしたケースを実施している。その設定根拠には「スプレイ開始が遅延した場合に、原子炉格納容器への負荷を解析」とのみ記されている(文献4の表7, 12頁)。これは基本ケースからの注水開始の遅延時間 35分(=90分-55分)に相当するが、その設定根拠の説明にはなっていない。(解析結果には、この遅延時間があっても格納容器のパウダリ温度は限界温度の 200℃を下回っている、と記されている。)

規制委員会が論じていない溶融炉心・コンクリート相互作用への影響評価について、この注水開始の遅延ケースを検討すると、図2に示されているように、MELCOR による原子炉压力容器破損は 72分なので、溶融炉心が格納容器内に落下する時点ではまだ注水が開始されていないことが判明する。すなわち、注水が溶融炉心の落下開始時に間に合っておらず、溶融炉心・コンクリート相互作用により床コンクリートの侵食の進行と、それに伴う有意な量の水素と一酸化炭素の発

生^{*10}は避けられない。これは注水対策が有効でないことを意味する。

次に、川内 1・2 号機の MAAP 解析評価にこの注水開始の遅延時間 35分を適用して、その影響を調べる。(遅延時間 35分の設定自体が過酷事故の状況下において十分なかどうかの問題もあるが、ここではそれは問わないこととする。) 図2の「川内 1・2 注水遅延ケース」に示すように、溶融炉心落下開始時点での注水時間は 6分間(=90分-84分)であり、水位はわずか約 0.2 m である。これでは溶融炉心・コンクリート相互作用を抑制できるかどうかはなはだ疑わしい。「技術報告」において自ら設定した注水遅延時間(35分)の影響について溶融炉心・コンクリート相互作用の定量的な検討を九州電力に求めることなく、九州電力が設定した短い遅延時間(10分)をもとにした MAAP による解析結果を妥当として、溶融炉心・コンクリート相互作用の抑制対

*10—溶融炉心・コンクリート相互作用の現象の説明は、前報(文献2)で行っているため、ここでは省略する。岡本らの本誌論考(文献6)に詳しい解説がある。

策が有効であるとした規制委員会の判断は妥当性を欠いている。

ここまでは審査書がすでに確定された川内1・2号機を対象に論じたが、指摘した問題は現在審査中の泊1・2号機を除くすべてのPWRに共通する。なぜならば、3ループプラントの高浜3・4号機、伊方3号機および泊3号機は川内1・2号機と事象進展時間がほぼ同じであり、川内1・2号機についての検討結果があてはまる。4ループプラントの大飯3・4号機では少し違って、図2に示すように基本ケースでの注水開始が事故発生後約51分、原子炉压力容器破損時間が約1.4時間(84分)であり、溶融炉心落下開始時点までの注水時間は33分(=84分-51分)、原子炉下部キャビティ水位は約1.1mである。この場合に「技術報告」で設定された注水開始の遅延時間35分を考慮すると、注水開始は事故後86分であり、溶融炉心落下開始時点の84分では注水がまだ開始されていない。玄海3・4号機は大飯3・4号機とほぼ同じ事象進展である。これによって、大飯3・4号機と玄海3・4号機での溶融炉心・コンクリート相互作用の抑制対策は有効でないことが明らかである。

なお、2ループプラントの泊1・2号機は溶融炉心落下開始時点が2.1時間(126分)と比較的遅い結果を示している、上記遅延時間を適用した場合の注水時間は約40分であり、注水量は確保できるといえる。

3

水素爆発の防止対策は有効でない

(1) 水素爆発の防止対策

過酷事故においては格納容器が破損する可能性のある水素爆発を防止しなければならない。本稿ではPWRで水素が短期的(事故後数時間内)に大量に発生する次の2つの要因に着目する*11。

*11—この他に、原子炉压力容器の内外での水の放射線分解、構造材金属の腐食などによる水素発生もあり、詳細評価ではこれらの考慮も必要であるが、短期的には①、②に比べると発生

- ①原子炉压力容器内部：炉心が高温状態になると燃料被覆管成分のジルコニウムが水と反応する。それ以外の金属と水の反応も生じうる。
- ②原子炉压力容器外部：炉心が溶融して原子炉压力容器が破損した後、注水および溶融炉心・コンクリート相互作用でコンクリートから出てくる水分が溶融炉心に含まれているジルコニウムおよびそれ以外の金属と反応する。
新規制基準では水素爆発*12の防止を求め、その判断基準を「格納容器内の水素濃度がドライ条件*13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。

PWR各社は新規制基準に適合させるために、格納容器内での水素爆発の防止対策として、水素量を低減処理する次の2種類の設備の設置を申請している。

- ①静的触媒式水素再結合装置(Passive Autocatalytic Recombiner: PAR)：白金系金属の触媒を用いて、水素を酸素と結合させる。プロワ、電気品などの動的機器はなく、水素を含む気体は自然対流で装置内に導かれる。一台の処理能力は約1.2kg/h(設計条件)で、5台設置することになっている。したがって全処理能力は6kg/hであり、炉心溶融時に発生する数百kgに及ぶ大量の水素*14を短時間に処理することはできず、長期的に徐々に低減させることを目的としている。
- ②イグナイタ：グロープラグ(電気ヒータ)に通電して水素を燃焼させる。電源および手動による通電操作が必要である。水素濃度が高くなると想定される箇所に12基設置することになっている。ただし、機能の信頼性が十分ではないこともあって、PWR各社はイグナイタ

量が2桁ほど小さい。

*12—水素爆発を生じる反応形態のうち、衝撃圧を生じる最も厳しい現象。

*13—水蒸気の内容は除外することを指す。

*14—一例として、全炉心内のジルコニウム量の75%が水と反応する場合、川内1・2号機では約700kgの水素が発生する。

を有効性評価上は考慮に入れていない。

(2) 設置変更許可申請書における水素濃度の評価結果

PWR 各社は、水素爆発防止対策の有効性を評価するための事故シーケンスとして、「大破断 LOCA + ECCS 注入失敗」を選定して、炉心溶融、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変化を解析評価している。その際、審査ガイド⁵に従い、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している。川内 1・2 号機、高浜 3・4 号機および大飯 3・4 号機の時間的変化を図 3 に示す。水素濃度(ドライ換算)最大値は、次のとおりである(各設置変更許可申請書添付書類上より)。

- ・川内 1・2 号機 約 9.7%
- ・高浜 3・4 号機 約 11.5%
- ・大飯 3・4 号機 約 12.8%

いずれも格納容器破損防止対策の評価項目である水素爆発防止の判断基準値 13% を下回っているとしている。

コラム 2

PWR の間で水素濃度最大値が相違する理由

川内 1・2 号機、高浜 3・4 号機、大飯 3・4 号機の順に水素濃度が高くなっている理由は、水素濃度に関係する解析条件の中の次の 2 項目の比較から理解できる。

	川内 1・2	高浜 3・4	大飯 3・4
①全炉心内のジルコニウム量(kg)：	20,200	20,500	24,800
②格納容器の自由体積 ^{*15} (m ³)：	80,100	67,400	72,900
参考値 ①と②の比	0.25	0.30	0.34

参考値[ジルコニウム量]対[自由体積]の比に着目すると、川内 1・2 号機が最小、高浜 3・4 号機が中間、大飯 3・4 号機が最大であり、水素濃

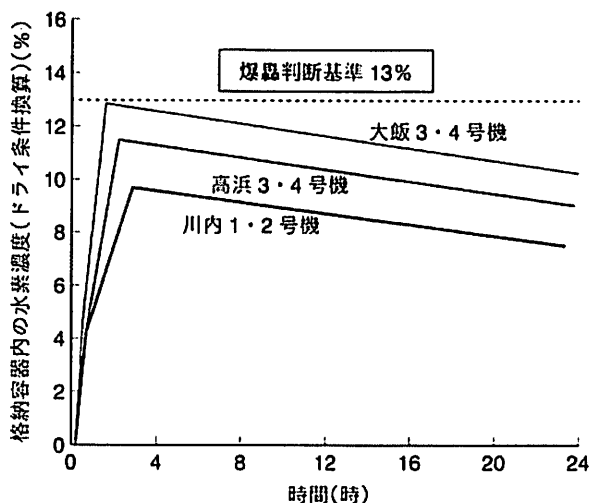


図 3—格納容器内水素濃度の時間的変化

ここで注目すべきは、判断基準値に対する余裕が高浜 3・4 号機では約 1.5% とわずかであり、大飯 3・4 号機では 0.2% とほとんどないことである。このために後述するように、水素発生量に対する不確かさの影響を考慮した場合に両原発では判断基準値を超えるのである。

審査ガイドに「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

度最大値はこの順序になっている。

なお、全炉心内のジルコニウム量は燃料集合体本数、すなわち熱出力にほぼ比例する。格納容器の自由体積は、格納容器の次の設備仕様の違いに由来する。

	川内 1・2	高浜 3・4	大飯 3・4
・型式：	鋼製	鋼製	プレストレストコンクリート製
・全高(m)：	87	77	65(内高)
・内径(m)：	40	40	43

他の 3 ループプラントである伊方 3 号機と泊 3 号機の型式、全高、内径は高浜 3・4 号機とほぼ同じであり、川内 1・2 号機のみ全高が約 10 m 大きいという特徴がある。このため、川内 1・2 号機は自由体積が最大であり、これが PWR の中で水素濃度最大値が最も小さい要因になっている。

*15—格納容器の自由体積とは、格納容器本体の容積から機器、構築物等の占有体積を差し引いた値。すなわち格納容器内部に存在する気体の体積を指す。

する」と規定されているが、PWR各社は、代替格納容器スプレイ操作により原子炉下部キャビティに注水して、溶融炉心が原子炉下部キャビティに落下する時点においては十分な水量を確保する対策をとって、溶融炉心の崩壊熱を除去してコンクリートとの相互作用を抑制することにより、床コンクリートには有意な侵食は発生しないので、それに伴う有意な水素発生はないとしている。この「有意な水素発生がない」とすることには、次に述べるように大きな問題がある。

(3) 溶融炉心・コンクリート相互作用に関する不確かさを考慮した水素量評価

川内1・2号機の審査において規制委員会は、知見が少ない溶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、溶融炉心・コンクリート相互作用の感度解析をふまえた水素発生について検討することを求めた。これに対して、九州電力は以下の説明をしたと審査書に記述されている(文献1の197~198頁)。

①原子炉下部キャビティ床面での炉心デブリ^{*16}の拡がり、炉心デブリと原子炉下部キャビティ水の伝熱等のパラメータを組み合わせた場合、溶融炉心・コンクリート相互作用により発生する水素は、すべてジルコニウムに起因するものであり、反応割合は全炉心内のジルコニウム量の約6%である。

②さらに上記を上回るものとして、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において、ドライ条件換算した格納容器内水素濃度は最大約12.6%であり、格納容器破損防止対策の評価基準13%を満足する。

規制委員会は、上記の九州電力の不確かさの影響評価が十分保守的であるため妥当であると判断した。

ここで、②の「全炉心内のジルコニウムが水と反応する」と仮定^{*17}した場合を、高浜3・4号機

と大飯3・4号機に適用すると、筆者推算による格納容器内水素濃度の最大値は約14.8%と約16.4%である^{*18}。明らかに水素爆轟防止の判断基準値13%を超えている。したがって、川内1・2号機の審査書に従い、溶融炉心・コンクリート相互作用による水素発生の不確かさを考慮すると、高浜3・4号機と大飯3・4号機の格納容器破損防止対策は有効でないことを示している。

その他の審査中のPWRの基本ケースでの水素濃度最大値は、伊方3号機—約11.5%、泊3号機—約11.6%、泊1・2号機—約11%であり、高浜3・4号機の約11.5%とほぼ同じであり、また玄海3・4号機の約12.8%は大飯3・4号機とまったく同じであることから、いずれも「全炉心内のジルコニウムが水と反応する」と仮定した場合に水素爆轟防止の判断基準を満足できず、格納容器破損防止対策は有効でないことを指摘しておく。

審査書では触れられていない既往の重要な知見として、(財)原子力発電技術機構による「重要構造物安全評価(原子炉格納容器信頼性実証事業)に関する総括報告書」(2003年3月)がある⁷。その「水素燃焼試験」の節に、「炉外における溶融炉心-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。溶融炉心-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^{*19}が

*17—事故前に全炉心内に存在したジルコニウム量のうち、75%が原子炉圧力容器内で冷却水と反応し、25%が格納容器内で溶融炉心・コンクリート相互作用および注水による水と反応するとの仮定。

*18—基礎式：水素濃度=水素モル数/(窒素モル数+酸素モル数+水素モル数)をもとに、全炉心のジルコニウム量の75%が反応した場合の水素発生量と水素濃度の値(PWR各社公表値)から窒素と酸素の合計モル数の値が求まる。この値はもともと格納容器内空気中に含まれていた窒素と酸素の合計量であり、ジルコニウムの反応量には依存しない。次に、その合計モル数と全炉心のジルコニウム全量が反応した場合の水素モル数を基礎式に入ると、対応する水素濃度が求まる。これは近似手法であるが、川内1・2号機については12.5%になり、九州電力の詳細計算値12.6%にはほぼ一致する。

*19—溶融炉心に含まれるジルコニウム以外の金属(鉄その他)

*16—炉心デブリとは、格納容器内に落下した溶融炉心を指す。

反応することもあり得る。」と記されている(文献7の2.2-4頁)。この知見と2節で述べた溶融炉心・コンクリート相互作用の抑制対策が有効でないことを合わせて考慮すると、川内1・2号機の審査で「全炉心内のジルコニウム量の全量が水と反応する」とした仮定について、規制委員会が審査書に記した「九州電力の不確かさの影響評価が十分保守的である」とは言えない。川内1・2号機ではジルコニウム量の全量反応に対しての水素濃度は約12.6%であり、判断基準の13%に対する余裕はごくわずかしかないので、溶融炉心に含まれるジルコニウム以外の金属(鉄その他)の反応を考慮すると、水素爆轟判断基準13%を超える可能性が高い。この不確かさを考慮すると、川内1・2号機も水素爆発の可能性が避けがたく、格納容器破損防止対策は有効でないと判断すべきである。

4 結論

新規制基準適合性審査結果が最初にまとめられた川内1・2号機の審査書および関連資料を検証した結果、以下が明らかになった。

(1)溶融炉心・コンクリート相互作用の抑制対策である代替格納容器スプレイによる原子炉下部キャビティへの注水について、手動操作開始時間の不確かさとして規制委員会の「技術報告」で設定された遅延時間のケースでは、溶融炉心落下開始時点ではまだ注水が開始されておらず、溶融炉心・コンクリート相互作用を抑制することはできないことが規制委員会のMELCOR解析結果で示されている。この遅延時間をPWR各社が実施したMAAP解析結果に適用すると、溶融炉心落下開始時点で川内1・2号機と高浜3・4号機では注水量の確保が十分ではなく、また大飯3・4号機では注水そのものが開始されていない。したがって、これらの原発における溶融炉心・コンクリート相互作用の抑制対策は有効ではなく、新規

が水と反応する量を、その水素発生量をもとにジルコニウム量に換算して「全炉心ジルコニウムの100%を超える量」と表記されていると解釈する。

制基準に適合していない。他の審査中のPWRについても泊1・2号機を除いて同様の理由で新規制基準に適合していない。

(2)川内1・2号機の審査における溶融炉心・コンクリート相互作用による水素発生の不確かさの影響評価にもとづき、全炉心内のジルコニウム量の全量が水と反応することを考慮すると、川内1・2号機を除く各PWRは水素爆轟防止の判断基準を満足できない。川内1・2号機では、既往知見「溶融炉心-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」ことを考慮すると、水素爆轟防止の判断基準を満足できない可能性が高い。したがっていずれのPWRでも水素爆発の防止対策は有効でなく、新規制基準に適合していない。

原子力規制委員会は(1)、(2)について川内1・2号機の審査をやり直すべきである。さらに現在審査中のその他のPWRについては(1)、(2)について厳正な審査をすることを求める。

謝辞 この論考の作成にあたり有益な助言をいただきました原子力市民委員会規制部会の井野博満さんと筒井哲郎さんに厚くお礼申し上げます。

文献

- 1-原子力規制委員会「九州電力株式会社川内原子力発電所の発電用原子炉設置変更許可申請書(1号及び2号発電用原子炉施設の変更)に関する審査書」(2014年9月10日)
- 2-井野博満・滝谷紘一: 科学, 84(3), 333(2014)
- 3-原子力規制委員会「九州電力株式会社川内原子力発電所の発電用原子炉設置変更許可申請書(1号及び2号発電用原子炉施設の変更)に関する審査書(案)に対する御意見への考え方(IV~V章関連)」(2014年9月)
- 4-原子力規制委員会 NTEC-2014-2001 NRA技術報告「格納容器破損防止対策の有効性評価に係る重要事象の分析(PWR)」(2014年8月)
- 5-原子力規制委員会「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」(2013年6月19日決定)
- 6-岡本良治・中西正之・三好永作: 科学, 84(3), 355(2014)
- 7-原子力発電技術機構「重要構造物安全評価(原子炉格納容器信頼性実証事業)に関する総括報告書」(2003年3月)

[資料]

常総生協による2011年原発事故直後の放射能汚染測定結果 第4回市民科学者国際会議発表資料より

【検査機関】東京ニュークリア・サービスつくば営業所, 【測定器】ゲルマニウム半導体測定装置 SEIKO EG&G 社製 GEM20P4 型, 【測定時間】1800 秒, 【測定方法】科学技術庁放射能測定マニュアルに準拠。検出限界の記録のあるものはカッコ内に示す。 放射能の単位は Bq/kg(母乳は Bq/L)

試料名	所在地	from F1	採取日	測定日	ヨウ素 131	採取日換算	3/21 換算	3/15 換算	セシウム 134	セシウム 137	セシウム計
母乳	茨城県 守谷市	188 km	2011.3.24	2011.3.27	31.8	41.2			不検出	不検出	不検出
	茨城県 つくば市	170 km	2011.3.24	2011.3.27	8.7	11.3			不検出	不検出	不検出
	茨城県 つくばみらい市	182 km	2011.3.25	2011.3.27	不検出	N.D.			不検出	不検出	不検出
	茨城県 つくば市	170 km	2011.3.30	2011.4.4	6.4	9.8			不検出(<4.9)	不検出(<4.7)	不検出
	千葉県 柏市	201 km	2011.3.30	2011.4.4	36.3	55.9			不検出(<1.5)	不検出(<4.4)	不検出
	茨城県 守谷市	188 km	2011.3.31	2011.4.4	8.5	12.0			不検出(<4.3)	不検出(<4.4)	不検出
	千葉県 柏市	201 km	2011.4.6	2011.4.7	14.8	16.1			不検出(<5.6)	不検出(<5.1)	不検出
ほうれん草	茨城県 石岡市中戸	150 km	2011.3.29	2011.4.1	1,625.8	2,105.7	4,196.9	7,040.0	232.2	261.6	493.8
ほうれん草	茨城県 石岡市		2011.3.29	2011.4.1	1,027.8	1,331.2	2,653.2	4,450.6	487.5	518.5	1,006.0
ほうれん草	茨城県 石岡市上曾		2011.3.29	2011.4.1	1,105.0	1,431.2	2,852.5	4,784.9	297.3	333.2	630.5
ほうれん草	茨城県 石岡市下林		2011.3.29	2011.4.1	2,159.1	2,796.4	5,573.5	9,349.3	1,204.2	1,278.0	2,482.2
ほうれん草	茨城県 石岡市下林		2011.3.29	2011.4.1	2,013.6	2,607.9	5,197.9	8,719.3	493.8	580.6	1,074.4
ほうれん草	茨城県 石岡市中戸		2011.3.29	2011.4.1	1,058.1	1,370.4	2,731.4	4,581.8	436.9	466.3	903.3
小松菜	茨城県 石岡市瓦谷		2011.3.29	2011.4.1	698.4	904.5	1,802.9	3,024.2	104.5	120.9	225.4
ネギ	茨城県 石岡市野田		2011.3.29	2011.4.1	252.2	326.6	651.0	1,092.1	9.4	18.6	28.0
ほうれん草(被覆あり)	茨城県 石岡市嘉良寿理		2011.3.29	2011.4.1	801.4	1,037.9	2,068.7	3,470.2	440.4	500.1	940.5
ほうれん草(被覆なし)	茨城県 石岡市嘉良寿理		2011.3.29	2011.4.1	1,341.5	1,737.5	3,463.0	5,808.9	504.5	569.8	1,074.4
レタス① (トンネル開閉あり)	茨城県 行方市山田	155 km	2011.3.29	2011.4.1	478.3	619.5	1,234.7	2,071.1	149.8	138.9	288.8
レタス② (トンネル開閉なし)	茨城県 行方市山田		2011.3.29	2011.4.1	258.1	334.3	666.3	1,117.6	176.9	188.5	365.3
小松菜	茨城県 行方市		2011.3.28	2011.4.1	1,011.4	1,427.9	2,610.8	4,379.5	380.6	430.9	811.5
ほうれん草	茨城県 常総市大生郷	177 km	2011.3.29	2011.4.1	914.1	1,183.9	2,359.7	3,958.2	154.9	181.4	336.3
ほうれん草	茨城県 坂東市生子	180 km	2011.3.29	2011.4.1	190.5	246.7	491.8	824.9	25.9	37.3	63.3
原乳	茨城県 石岡市	150 km	2011.3.30	2011.3.30	7.8	7.8	16.9	28.4	1.7	4.6	6.2
原乳	福島県 川俣町山木屋	32 km	2011.4.2	2011.4.7	21.8	33.5	94.4	158.3	47.7	65.1	112.5