

第4回燃料技術評価検討会における外部専門家及び専門技術者の評価意見及びその回答

No.	安全研究プロジェクト	外部専門家・専門技術者	評価項目	評価意見	回答
1	燃料健全性に関する規制高度化研究	有馬 立身 氏	②解析実施手法、実験方法が適切か。	<p>・被覆管外面割れに至るプロセス①水素の拡散・析出、②亀裂進展の個別効果試験の統合試験として、ハルデン炉の試験に替えて FEM 数値解析を行っているが、その妥当性、数値解析による評価の定量性、信頼性について言及してほしい。</p>	<p>本研究で用いた FEM 解析手法の予測性能については、2.1.2(1)で検討しており、2.1.1(2)で実施した試験における破損時間と比較し、当該モデルが一定の予測性能を有することを示しております。</p>
2			④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。	<p>・被覆管外面割れ破損に関して、BWR 被覆管では割れは見られたが、PWR 被覆管では見られなかった、という結果に対する検討として、温度を主たる原因としているが、それ以外の要因、例えば被覆管自体の性質、冷却水の性質などが主たる原因としでは排除できる理由を整理していただければと思います。</p>	<p>系統的に調べられたわけではありませんが、IAEAにより、再結晶焼鈍処理（主に BWR 被覆管に適用されている）材の遅れ水素化物割れ（以下「DHC」という。）亀裂進展速度は、バラツキがあるものの、応力除去焼鈍処理（主に PWR 被覆管に適用されている）材のそれより小さい傾向があるというデータが報告されています。</p> <p>これは、材料的観点では PWR 被覆管の方が亀裂進展性が高いことを示唆するデータであり、材料自体の機械的性質に起因して、PWR 被覆管において外面割れ破損（DHC 破損）が見られなかったわけではないと考えられます。</p> <p>また、外面割れ破損のメカニズムである DHC</p>

3			その他	<p>・初期亀裂の発生メカニズムに対しては、FEMソフトウェアとしてANSYS、統合試験の模擬試験としては、ABAQUSが数値解析に使用されています。それらを選定した理由があれば簡単で結構ですのでお示してください。</p> <p>・各々の試験は系統的に行われており、試験条件も十分網羅されている。また、規制基準との整合性・関係性も明確に示されていると感じました。</p>	<p>は、化学的な相互作用に起因する応力腐食割れとは対照的に、物理的な相互作用に起因する亀裂進展現象であり、その点を踏まえると冷却水中の微量な化学成分組成が与える影響は小さいと考えております。</p> <p>それぞれの検討時期が平成22年度、令和元年度と期間が空いていることが背景としては大きく、それぞれの検討の際に、汎用ソフトウェアの中から最適なものを選択したというのが理由です。</p> <p>拝承</p>
4		黒崎 健 氏	①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。	<p>踏まえているといえる。しいて言う、海外における同様の研究の最新知見を十分に確認しているかという点では、若干物足りなさを感じる。</p>	<p>拝承、水素化物による被覆管脆化に関しては先行研究について十分確認し、代表的と考えられる文献を報告書の序論等で引用しております。</p> <p>外面割れ及び改良合金の照射成長に関しては海外での先行研究の報告例が限られていたため、引用という形で明には現れていませんが、既往の研究及び最新知見は逐次確認しながら研究を進めて参りました。</p>

5		②解析実施手法、 実験方法が適切 か。	適切であるといえる。とくに、外面割れ破損に 関する研究では、照射試験が実施できないとい う状況下で、個別の要素試験と計算機シミュレ ーション（FEM 解析）を組み合わせることで、 うまく総合的な評価につなげている。FEM 解析 に際して、妥当な物性データが用いられている。	拝承
6		③解析結果の評価 手法、実験結果の 評価手法が適切 か。	適切であるといえる。例えば、外面割れ破損に 関する研究で行われた FEM 解析に際して、妥 当な物性データが用いられている。一方、改良合 金被覆管の照射成長に関する研究では、試験方 法や試験結果は妥当なように見えるが、結論（例 えば、従来材被覆管と比べて改良合金被覆管の 照射成長量は小さい）を導くにはデータ数が若 干少ないようにも思う。	拝承 照射成長に関しては、ハルデン炉が閉鎖され たことを受けデータ数が限られておりますが、 主要な改良合金被覆管材料について約 8×10^{25} n/m ² までのデータを取得できたことが今回の研 究の一つの重要な成果であると考えておりま す。
7		その他	この一連の研究において、これまで非常にた くさんの実験データ・解析結果等が得られてい るものと思われる。それらの貴重なデータをき ちんと整理・分類・有効活用することが重要であ る。近年、情報科学やデータ科学の分野が大きな 発展を遂げている。整理・分類された膨大なデー タを、そういった最新の技術で解析するという ような、新しい方向性を今後考えてもよいので はないか。	蓄積されたデータを今回一度まとめたわけ ですが、ご指摘のようにこれで終わりというわ けではなく、それらを踏まえ、例えば別の安全 研究プロジェクトで活用する等に繋げるとい うこともあり得ると考えております、検討致し ます。 拝承。

				委託先だけでなく、規制庁が主体的に論文発表していることは高く評価できる。発表されている論文の学術的な質も高いように思われる。	
8	燃料健全性に関する規制高度化研究	大塚 康介氏	③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	出力急昇試験は実施できなかったわけだが、解析などによって補完することによって、本研究の目的を達成できたことや本研究で導き出された結論に問題ないことをきちんと論理だてして説明した方がよいと考えます。	ご指摘ありがとうございます。本研究では、出力急昇試験で確認できなかった応力緩和の効果について FEM 解析により補完しました。報告書においては、本研究で用いた FEM 解析手法の予測性能について 2.1.2(1)で一定の予測性能を有すること、その手法を用いた検討(2.1.2(2))により、応力緩和を踏まえても個別効果試験の結果が十分保守的であるということを確認し、示しております。 また、これを踏まえ、保守的なデータである個別効果試験の結果と設置変更許可申請における過渡解析の結果を比較し、外面割れ破損が系統的には起こらないだろうという結論に繋げております。
9			その他	外面割れ破損が発生する時間については、亀裂が生じるまでの時間と亀裂が進展する時間に分解して整理した方がよいと考えます。	ご指摘ありがとうございます。個別効果試験においては、亀裂が生じるまでの時間と亀裂が進展する時間に分解して試験結果を整理しております。 FEM 解析についても、同様に分解して検討致しました。

10	高 島 勇 人 氏	その他	<p>①ppt 9 ページ: 左図の曲線は引用文献にあるモデルで計算されたものと考えるので、試験データをプロットするなど、45kW/m でも 20 分程度を要するという結論が試験結果から導出される過程がわかるようにするべき。(右図はその点、わかりやすい。)</p> <p>②同上: ppt 8 ページを見るとヒーター到達出力は 25kW/m~45kW/m で設定されたように見えるが、9 ページの左図の曲線は 60kW/m まで描かれている。60kW/m 相当まで試験をされているのであれば、その旨、8 ページにも記載された方が良く考えるし、BWR の過渡条件は承知していませんが、45kW/m で十分であれば、その先は試験で検証されていないので曲線を止めておくべきではないか。</p>	<p>ご指摘を踏まえ、図に試験データを合わせてプロットする修正を行いました。</p> <p>9 ページ左図の曲線は、解析的な評価の結果であり、過渡条件を包絡する観点で 60 kW/m まで表示しております。</p> <p>試験については、ご推察のとおり、25kW/m~45kW/m で設定しております。</p>
11	平 井 睦 氏	②解析実施手法、実験方法が適切か。	<p>ペレットの熱膨張による歪支配の現象と考えられる水素化物外面割れを理解・評価するにあたり、BWR 燃料で実施したような現象をモデル化しメカニズム理解を行う目的の内圧支配試験と PWR 燃料で実施したような発生を調べる目的の歪支配試験を目的に応じて適切に選択して実施していると思われる。</p>	<p>拝承。</p>

12	事故時炉心冷却性に対する燃料破損影響評価研究	有馬 立身 氏	②解析実施手法、実験方法が適切か。	<ul style="list-style-type: none"> ・ LOCA 時燃料破損の際燃料ペレットの細粒化について、Xe や Kr の FP ガスの放出を同時に測定されているのは、細粒化と FP 放出の関係を明確にするうえで有用と思います。試験条件の温度変化とこれらの FP ガス原子かボイドの燃料中での細粒化に至るまでの移行挙動について更に追求していただければと思います。 	FP ガス測定に加えて、SEM によるペレット片表面観察も進め、細粒化メカニズムを調査していきます。
13			③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	<ul style="list-style-type: none"> ・ LOCA 時に細粒化した燃料がピン外に放出される、あるいはピン内で崩落し蓄積することによって、燃料の発熱状態は通常運転時とは全く別なものになることが予想されます。そのような状況で、炉心の事故後の冷却性能がどう変化するかについて言及が欲しい。 	被覆管の膨れた箇所に細粒化したペレット片が充填され、局部的に発熱量が大きくなること等が考えられます。現在までは、ペレット片を用いた加熱試験しか実施していませんが、今後、燃料棒を用いた試験を実施しますので、放出量の検討と併せて、冷却性への影響についても言及するようにします。
14			④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。	<ul style="list-style-type: none"> ・ 試験の内容が、破損事故が起きるか／起きないか、あるいはその契機となる現象については詳細に検討されていると思いましたが、本プロジェクトは事故時炉心冷却性に対する影響評価であるにも関わらず、冷却性との関係が見えにくいと感じます。「冷やす」という点で、どのように炉心破損が冷却性に関係するのかを整理して下さい。 	ご指摘のとおり、本研究は、破損挙動に着目しておりますが、最終報告では、破損挙動への変化（従来と異なる破損）がどのように冷却性に影響するか、定性的な影響について考察するようにいたします。
15			その他	<ul style="list-style-type: none"> ・ コロナ禍の影響でプロジェクトが計画通り進められるのか懸念しておりましたが、期間内で 	コロナ禍の影響については、今後も不透明な部分はあると思いますが、当初計画の5ヶ年の

				目的は達成できるとの見通しであるとのことでしたので、鋭意進めていただければと思います。	中で目的を達成できるように、鋭意進めて参ります。
16		黒崎 健 氏	①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。	踏まえているといえる。しいて言う、海外における同様の研究の最新知見を十分に確認しているかという点では、若干物足りなさを感じる。	FFRD については、海外の研究プロジェクトでも試験が実施されていますので、関連する情報を漏れなく収集し、最終報告では、それらの結果と比較し、考察していきます。
17	②解析実施手法、実験方法が適切か。		適切であるといえる。ペレット加熱試験に関しては、FP ガス放出と細片化の相関を把握することが重要である。LOCA 後被覆管振動時応力解析に関しては、集合体体系に対してきちんと解析をなすことが重要である。	細粒化については、SEM でも試料表面観察も実施し、FP ガス放出との関係を考察していきます。被覆管応力解析については、集合体体系での解析条件等を確認するとともに、解析結果の妥当性についても考察していきます。	
18	③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。		適切であるといえる。RIA 時燃料破損に関して、破損エンタルピー低減の原因を半径方向水素化物の生成に落とし込んでいるが、今回の結果を見る限り、妥当なように見える。一方、半径方向水素化物生成の原因については、ベース照射中の引っ張り応力が候補に挙げられているが、それで必要十分なのか？さらなる調査が必要なおもう。	半径方向水素化物生成の原因については、今後、追加で RIA 模擬試験を実施した燃料棒の被覆管金相観察結果がでてきますので、ベース照射中の引っ張り応力のみで半径方向水素化物生成を整理できるのか、考察していきます。	
19	その他		Cr コーティング Zr 合金被覆管といった新しい材料について、積極的に研究を推進すべきである。 成果発表に関して、委託先だけでなく、規制庁が主体的に成果発表することが重要である。報告	Cr コーティング Zr 合金被覆管については、規制側の安全研究として、どのようなことを実施すべきか、本 5 ヶ年計画の中で検討して、必要に応じて、今後の研究プロジェクトにおいて、試験等を実施していきたいと考えていま	

				書の作成で終わるのではなく、論文発表までつなげるべきである。論文発表（論文執筆・査読者とのやり取り等）を通じて、研究力は大きく強化される。	す。 「燃料健全性に関する規制高度化研究」では、その成果を論文にまとめ、日本原子力学会の論文賞を受賞しましたので、本研究についても、規制庁として論文作成し、積極的に公表していきたいと思います。
20	事故時炉心冷却性に対する燃料破損影響評価研究	大塚 康介 氏	その他	OS-2 の試験後観察等の RIA 模擬試験の今後の予定を示していただきたい。 OS-1 燃料の運転中応力評価が示されているが、この応力上昇は何に起因しているのか不明確なので言及されたい（何か特徴的な運転履歴に起因しているのか等）。また、関連して燃料棒内圧や FGR は測定されているのであれば示していただきたい。	OS-2 の試験後観察結果等は、学会等で適宜発表していきます。 OS-1 の応力上昇については、ご説明しましたとおり、添加型ペレットの焼きしまりが小さく、PCMI が早期に開始したことが主因と考えていますが、その他にも運転履歴や添加型ペレットのスウェリングも関係していると考えられ、今後、さらに整理して、学会発表等で示していきたいと思います。ベース照射後の FGR 等は公表可能であるか確認して、可能であれば、上記と併せて、学会等で発表していきたいと思います。
21		高島 勇人 氏	③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	①中間評価用資料本文5ページによると、ペレット片を真空中で加熱しての試験ということで、被覆管による拘束が模擬されていないので、その点、実機での挙動評価へつなげる際には評価していただく必要があると考えます。特に、燃焼が進んだ燃料ではペレットのリロケーション	①ご指摘のとおり、リロケーションや被覆管拘束の影響はありと考えており、それらについては、燃料棒で実施する LOCA 模擬試験で確認します。また、海外プロジェクトのハルデン炉プロジェクトや SCIP の結果も参考にして検討していきます。

22		その他	<p>や被覆管との相互作用で径方向の拘束力が大きくなっており、ペレットの細片化挙動への影響が無視できない（細片化を防ぐ方向に働くと推察）と考えます。</p> <p>②また、F P ガス放出挙動についても、実機では被覆管内で飽和圧に至っている状況からの追加放出になるため、試験で得られる真空中での追加放出挙動とは異なる可能性についても評価していただく必要があると考えます。</p> <p>①ppt 8 ページ：供試体の燃焼度を記載いただきたい。</p> <p>②ppt 1 3 ページ：燃料健全性評価の研究では「測定面積で規格化された水素化物の長さ」を指標として整理しているが、本研究では「径方向への投影長さの最大値」で整理されている。その方がデータ整理がうまくいったということだと思うが、前者で整理した場合はどうなるのか、整理されているのであれば、併記されてはいいかがか。RIA 時は急峻なエネルギー上昇現象なので、測定面積で規格化した値より、長さそのものの方が関連度が強い、という評価であれば、その旨、追記されてはいいかがか。</p>	<p>②本研究では、真空中で試験していますが、平成 30 年度まで実施した事故時燃料安全性に関する規制高度化研究では、加圧環境下の加熱試験も実施しており、今後は、その結果も併せて、細粒化メカニズムについて考察していきます。なお、加圧環境下の加熱試験結果については、令和元年に開催した本評価検討会で御説明しており、また、今後、論文で公表予定です。</p> <p>①報告書のほうには、記載しております。スペイン Vandellos-2 で照射された UO₂ 燃料で、試料の燃焼度は 81GWd/t です。</p> <p>②ご指摘のとおり、半径方向水素化物の評価について、燃料健全性評価の研究とで評価方法が異なりましたが、最終報告までには、追加で RIA 模擬試験を実施した燃料棒の観察が進み、データも蓄積されますので、評価方法についても比較、考察を行い、最適評価方法について提案したいと思います。</p>
23	平井 睦 氏	その他	1) 解析結果、実験結果と炉心冷却性の評価の関連をもう少し明示的に記載したほうが、研究	1) 重大事故に進展することなく、設計基準事故にとどまるための判断基準(要件)として、

			<p>全体のアプローチの妥当性を、より明確に示せるのではないか。</p> <p>2) LOCA 時ペレット細片化については、通常運転時のペレット内応力状態も影響する可能性が考えられるので、細片化機構を議論する際には多面的な試験パラメータの検討が望まれる。ただし、細片化が安全性に与える影響に関する評価を先行させることが重要ではないか。</p>	<p>炉心燃料の冷却可能形状維持があり、本来は、燃料の冷却可能形状維持、さらに正確に言うところ、高燃焼度化に伴う破損形態変化に着目した研究ですが、そこを炉心冷却性としたため、全体がわかりにくくなってしまいました。今後は、背景等で、炉心冷却性の中でも、燃料の形状維持や破損形態変化に着目していることを説明するようにします。破損形態の変化が炉心冷却性にどのような影響を与えるか、定性的な影響については、本研究の中で検討していきたいと思います。</p> <p>2) FFRD については、被覆管膨れ部に集積して局所的な発熱量が大きくなる等、定性的な影響評価を先行して実施していきます。また、細粒化メカニズム検討のみならず、定量的評価にも、細片の粒径や放出条件等が必要となりますので、ご指摘のとおり、可能な範囲で多面的にパラメータを設定して、試験を実施するようにします。</p>
--	--	--	---	---