

第 11 回プラント安全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	火災防護に係る影響評価に関する研究	北田 孝典 氏	②解析実施手法、実験方法が適切か。	ケーブルの熱劣化評価において、200℃以上の温度だけの結果だけで十分であるのか不明。また経年劣化の模擬にあたり、可燃物の量が減少していることが経年劣化に相当するのか、ということも含めて、130℃以下での加熱を用いていることの妥当性が不明。	<ul style="list-style-type: none"> 電気ケーブルの熱劣化評価につきましては、火災源近傍、煙プルーム中、高温ガス中、トレイ内火災の4つの火災シナリオの条件に設定しているため、また、一般的に火災時に加熱される電気ケーブルの破損温度は 200℃以上とされているため (NUREG/CR-6931)、本試験の熱劣化温度を 200℃以上としました。火災時に加熱される電気ケーブルの温度につきましては適時見直して参ります。 経年劣化の模擬の電気ケーブルにおいて、総発熱量が低下した原因は、主に絶縁体等の有機物が部分的に酸化したためと考えています。また、通常運転時の温度範囲 (20℃～60℃) を踏まえた加速試験の実績 (120℃前後) から経年劣化模擬の温度範囲を設定しています。
2			③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	ケーブルの熱劣化評価において、アレニウスの式で整理できることは新たな知見であるが、200℃以上であることを踏まえるべき。繰り返し疲労と同様に、熱劣化が実質的に進まない加減温度が存在するのではないか。関連して、経年劣化	<ul style="list-style-type: none"> 200℃以下の熱劣化温度でもアレニウスの式で整理できる知見を得ております。 新品と熱劣化模擬の電気ケーブルは、同じ製品であり、同じ寸法のものになります。試験では、電気ケーブルの温度とともに絶縁抵抗を同時に測定し

3			<p>したケーブルの絶縁抵抗の低下温度が低い、という記述は正しいか疑問が残る（温度測定ではなく加熱時間の違いで温度に換算されているが、経年劣化模擬ケーブルが新品ケーブルと同じ温度で上昇しているか不明である）。</p> <p>解析コード等の整備において、空気加熱割合 kp を経時変化させることで実測結果に一致することは一つの知見であるが、kp を細かく経時変化させれば実験結果に合う結果と出来ることは当然であると考えます。むしろ、そのような調整を必要とする原因・物理現象を考え、そのような事象を考慮に入れることを考えるべきではないか。</p> <p>④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。</p>	<p>先行研究プロジェクト成果の活用で作成された基準・ガイド類の見直しの要否に必要な技術知見の取得として、HEAF、ケーブルの熱劣化、解析コード等の整備、が必要であることはわかるが十分であるか、またその他がある場合の優先順位が判断できない。</p>	<p>ており、経年劣化模擬ケーブルは新品ケーブルよりも、低い温度で早期に絶縁抵抗が低下しております。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・空気加熱割合 kp を経時変化とともに小さくする場合に解析値と試験値が一致する理由としては、経時変化に伴い空気密度が下がり、空気への伝熱が起こりにくくなるためと考えております。空気加熱に係る物理現象に関しましては、後継研究プロジェクトで検討して参ります。 ・国内外の火災防護規制、火災防護研究の現状については、IAEA 標準作成の WG、OECD/NEA プロジェクトへの参画、米国 NRC/仏国 IRSN 等との情報交換・共同研究等により情報を得ており、それらの情報を踏まえて本プロジェクトの研究計画を策定していますので、基準・ガイド類の見直しの要否に必要な技術的知見の取得として、十分だと考えております。
4		その他		<p>質疑の中で回答がありましたが、成果の活用における「熱劣化評価の知見」の「ケーブルの系統分離対策の確認」への活用が良くわかりませんでした（どのケーブルが劣化しやすいかは評価できるとは思いますが、この評価結果が系統分離対策の</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ケーブルの系統分離対策について、事業者は延焼防止の観点から対策を実施していますが、施行不良等により熱影響の防護の不適合箇所が多数見つかっており、その箇所ではケーブルは熱の影響を受け、その熱によって絶縁低下が起こり誤信号発生等

			<p>確認につながる活用方法が良くわかりませんでした。</p> <p>後継研究プロジェクトにおける HEAF 評価に関して、電気故障の一つである HEAF は避けられないため「爆発現象緩和」に関して進められるとのことだが、深層防護を踏まえれば「爆発現象緩和」だけでなく「爆発現象発生防止」についても進めるべきではないか、と考えます。</p> <p>後継研究プロジェクトにおけるケーブルの熱劣化評価に関して、熱劣化評価結果とケーブル火災の関連を定量的に明らかにするべきであると考えます。(例えば熱劣化の程度とケーブル火災の発生確率の関連など)</p>	<p>の原因になります。そのため「熱劣化評価の知見」は、そこに敷設されているケーブルの熱劣化が原子炉の安全停止に直接又は間接的に影響を及ぼすか否かの判断材料になります。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・後継研究プロジェクトにおいて「爆発発生防止」についても検討いたします。 ・後継研究プロジェクトにおいて、熱劣化評価結果とケーブル火災の関連を定量的に評価いたします。
5		五福 明夫 氏	<p>①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか</p> <p>本研究プロジェクトでは、実際に原子力施設で発生した事象に基づいて実験や解析などを実施しており、原子力施設の安全規格やガイドラインの制定・改訂に資する重要かつ地道な研究と理解致します。本研究プロジェクトに関連する OECD/NEA のプロジェクトの取り組みや成果の情報収集を行っていることから、これらのプロジェクトの動向も踏まえていると推察され、国内外の過去の研究や原子力分野での最新知見を踏まえていると評価される。なお、既に参考にされているかもしれませんが、HEAF は一般産業の電気</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・拝承

6			<p>②解析実施手法、実験方法が適切か。</p>	<p>設備でも発生し得ることから、電気設備関連業界の情報も参考にするとより良いと思われます。</p> <p>実際に発生した事象を出発点として実験や解析の体系や方法を設定しており、その意味では手法や方法は妥当と評価されます。その一方で、規格やガイドラインの観点で明らかにすべき点や実験や解析の精度がどの程度であるべきかの規制側の要求事項と手法や方法の対応が、報告書等でもあまり説明されておらずやや不明確です。今回の研究プロジェクトの場合では、HEAFの爆発メカニズム、ケーブルの熱劣化の詳細や知見が不明な段階での規格やガイドラインでは、保守的に規定されている部分があると想像しますが、そのような部分を意識した解析や実験の計画の立て方もあると考えます。また、得られたデータや知見により改訂や補足が必要となる部分が出てきた場合には、ベンダーやユーティリティへの迅速な情報提供として報告書で言及いただくことも必要と考えます。</p>	<p>・ 拝承</p>
7			<p>③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。</p>	<p>実験結果の解釈においていくつか質問があります。1) HEAFにおいて爆発後数秒間の安定的な圧力は金属ヒュームの発生によるとされていますが、金属ヒュームの発生量は爆発後数秒間にわたって同程度で推移するのでしょうか？ 2) また、今回の実験では被覆のあるケーブルは使用さ</p>	<p>以下回答いたします。</p> <p>1) 金属ヒュームの発生量に関しましては、ほぼ一定に推移すると考えています。その理由といたしましては、アーク放電時間に応じて金属母線の損失量（溶融・蒸発による）が直線的に変化することが試験的に確認されたためです。</p>

			<p>れていないのかもしれませんが、実際の電源盤では被覆ケーブルが用いられていることから、被覆部分も燃焼あるいは昇華すると思いますが、その影響も加味されて安定的な圧力となっているのではないのでしょうか？ 3) 空気加熱割合を時間的に変化させることにより解析結果が実験結果と良く一致したとのことですが、何故時間的に変化させると良いかの背景となる物理メカニズムまで考察いただくと、予測（実験結果の無い）解析の精度が上がると考えます。多分、爆発と燃焼による筐体内圧力上昇により爆発前の空気が排出されたことや、温度上昇による空気の熱膨張により、見かけの空気加熱割合が変化していると思われる。</p>	<p>2) 今回の試験では、爆発現象にフォーカスしているため、筐体内外にケーブルは設置しておりません。そのため実電源盤におきましても圧力スパイク以外の部分におきましては、安定的な圧力となっているものと考えられます。</p> <p>3) 挿承、圧力上昇によって筐体内の空気が排出されるため、また、加熱によって空気が熱膨張するため空気の希薄化が起こり、空気加熱割合を変化させる必要があるものと考えております。今後、空気の排出による希薄化と熱膨張による希薄化について整理し、見かけの空気加熱割合が変化していることについて考察して参ります。</p>
8		④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。	<p>特に大きな点は無いと考えます。なお、ケーブルの劣化に関しては、熱による劣化だけではなく、ケーブル材料の熱や燃焼による化学変化による劣化もあると考えられ、今後の研究プロジェクトでは是非取り上げていただきたい。</p>	<p>・燃焼に伴う化学変化によるケーブル劣化は NRC や OECD の試験研究で多くのデータが得られておりますので、それらを活用した後継研究プロジェクトの「火災影響評価手法・解析コード等の整備」にて研究実施中です。</p>
9		その他	<p>報告書にはグラフから求めたデータ（例えば、ケーブル劣化の TR）の求め方が明記されていないので、結果が正しく解釈されて活用されない場合が出てくるのが予想されます。将来にわたって貴重な実験データを有効活用するには、データの求め方（計算方法）は報告書あるいは内部詳</p>	<p>・挿承</p>

			<p>細資料で正確に記述しておくことが肝要と思います。</p> <p>ケーブル被覆の材料は年々進歩しますが、そのデータ収集と規格やガイドラインへの反映の仕組みを構築しておくことも必要と考えます。</p> <p>蛇足かもしれませんが、いくつかの実験や解析は外部に委託されていますが、外部委託による成果に関しては、詳細な情報（実験方法や実験結果の整理方法など）を十分に引き継いでおくようにして下さい。</p>	
10		山路 哲史 氏	<p>①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか</p> <p>これまでに日本が OECD/NEA の HEAF プロジェクトの活動等を国際的にもリードしており、米国 NRC の動向等も踏まえて規制に必要な研究開発に取り組んでいるとの説明があり、最新知見が反映されていることが確認できた。尚、系統分離対策が徹底されている日本では米国が実施しているような回路解析は不要との説明があったが、これに限らず、従来前提としていた条件や考え方等に将来、変化があった場合には必要に応じて速やかに新たな課題を抽出できるようにしておくのが望ましい。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 拝承 ・ 日本では米国が実施しているような回路解析は不要とは考えておりませんが、系統分離の徹底が行われていることを踏まえて、現在の規制基準の中では回路解析までは要求しておりません。
11			<p>②解析実施手法、実験方法が適切か。</p> <p>HEAF の爆発現象の把握及びメカニズム解明、ケーブル熱劣化試験方法の検討及びプレ試験、ケーブルトレイ火災評価のケーブル束のモデル化、空気の爆発現象のモデル化についての解析・実験</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 拝承

12			③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	<p>方法はいずれも適切であったと評価できる。尚、空気の爆発現象のモデル化に用いられている空気加熱割合は解析結果に対する感度が高いため、今後、さらにモデルの精緻化・妥当性の検討が進むこと（物理的な現象の理解との対応が進むこと）が期待される。</p> <p>HEAFの爆発現象の把握及びメカニズム解明、ケーブル熱劣化試験方法の検討及びプレ試験、ケーブルトレイ火災評価のケーブル束のモデル化、空気の爆発現象のモデル化についての解析・実験結果の評価はいずれも適切であったと評価できる。電気ケーブルの熱劣化評価については、絶縁低下速度など熱劣化に関する基礎的な知見等が得られているが、後継研究プロジェクトでさらにそれらの理解が深まることが期待される。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 拝承
13			その他	<p>プロジェクト期間中に多くの外部発表があり、評価できる。プロジェクト終了後も成果を積極的に学術論文誌等で発表されることが期待される。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 拝承
14	火災防護に係る影響評価に関する研究	新井 健司 氏	①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか	<p>火災防護に関しては国際的に共通の課題として研究が進められている分野であり、今回得られた技術成果やその規制上の意義について海外の規制機関や火災防護専門家とも議論を重ねていただきたいと思います。また、これらの議論の経緯、内容については適宜公開していただくことを希望します。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 拝承

15		③解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。	<p>HEAFに係る爆発解析モデル整備改良：空気加熱割合を変更することで試験結果との一致が改良していますが、この知見が一般性のある知見かどうか、現象のメカニズム検討やその他の試験条件における解析など実施も含めて検討を深めるべきと考えます。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・一般的には空気加熱割合(kp)を一定にして解析が行われています。従いまして、kpを経時変化させながら解析を実施する手法は新しい解析手法になります。 ・これまでのHEAF試験では、爆発圧力データのバラツキが大きいため、試験値と解析値の差違にはあまり着目されてこなかったと存じております。一方で、規制庁のHEAF試験は爆発現象にフォーカスした要素試験であるため、また、電気盤ではなく管体を用いたHEAF試験であるため、バラツキが少ないのはもちろんのこと、種々のパラメータを変化させた場合の爆発圧力データの取得が可能になっております。 上記のことを踏まえて、後継研究プロジェクトではkp可変解析の妥当性について、爆発メカニズムの検討やその他の試験条件における解析など実施してまいります。
16		その他	<p>次フェーズの開始に当たっては、「基準及びガイド類の見直し要否の検討に必要な技術的知見を取得する」という研究目的に照らして、どこまでの知見が得られれば研究が完了するのか、火災解析モデルの整備ではどこまでの整備をもって完了とするのか、定量的なゴールの設定が望ましいと考えます。これにより達成度評価が可能となります。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・拝承、後継研究プロジェクトでは、各項目に対して定量的なゴールを設定し、達成度を確認しながら進めて参ります。

17		溝上 伸也氏	①国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか	<p>HEAF については、我が国が国外に比較して先行している状況であり、最先端の取り組みとして評価できる。また、ケーブルの熱劣化に対しては OECD/NEA の枠組みを活用して国際協調により過去知見も含め進めていると考える。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 拝承
18			②解析実施手法、実験方法が適切か。	<p>HEAF の実験については、爆発現象が閉空間の体積、開口部からの流出のしやすさの影響を受けることから試験体の体積、開口部の面積を変更できる実験を実施したことは適切であったと考える。一方で、実験結果として示されたのは 1 ケースのみであったため、実験自体が適切であったかに若干の疑問が残る。特に、爆発のように進展にランダム性が伴う事象に対しては、同一条件であっても完全な同一結果となるとは限らないため、1 実験条件に対する不確かさの確認が必要。</p> <p>また、爆発実験の初期の圧力スパイクがアーク放電の熱によって生じた空気の熱膨張のためとあるが、この現象理解は適切か？アーク放電に伴う局所的かつ急激な空気膨張（爆発）の下で生じた圧力波の伝播による圧力の急昇、そしてその後の圧力波の反射／吸収／拡散による減衰が、空気流出による減圧に重なることで、圧力スパイクとして現れたのではないか？</p> <p>ケーブルの熱劣化の実験については、OECD/NEA の PJ で実施されたものを活用して</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 拝承 ・ 論文投稿等も控えておりますので、代表的な HEAF 試験の結果 1 ケースのみの説明とさせていただきます。 ・ HEAF 試験に関しましては、種々のパラメータを系統的に変化させてデータを取得し、それらを基に解析を行っております。また、再現性を確認する試験も別途実施しておりますが、規制庁の筐体を用いた要素試験ではデータのバラツキが小さいものとなっておりますので適切な試験を実施したものと考えております。 ・ 爆発の形態としては物理的爆発と化学的爆発に区分されます。これまでの規制庁の要素試験から爆発現象は、アーク放電に起因する空気の熱膨張と金属ヒュームの発生であることが解析結果から示唆されており、それらは 2 つとも物理的爆発であるといえます。加熱による気体等の急速な熱膨張等は、その速度が音速を超えるものではないと考えておりますので、衝撃波が発生するものではないと整理しております。また、規制庁の要素試験では衝撃波の

③解析結果の
評価手法、実
験結果の評価
手法が適切
か。

いるとの事であり、実験方法の適切性評価の対象外との認識である。

実験結果の評価に対しては、②に述べた通り実験結果の代表性に関する評価が不足しており、また、2.2.4に記載されたメカニズムについては、定性的な評価にとどまっているものの、実験の観測結果からすれば、おおむね爆発現象を説明できるものと考ええる。

ただし、解析結果については、圧力挙動への感度の大きい空気加熱割合 kp を時間変化させることで再現が可能との結論であるが、現象理解に即したメカニズムに従った機構論的なモデルを構築し、その適用性に係る検討を行ったうえで丁寧に結論付けることが望ましい。このような検討を通じて様々な試験条件に対してモデルの適用性を確認できるようにする必要がある。現状のままでは、 kp は単なる調整パラメータに過ぎないことになり、再現解析ごとに再調整しなければならなくなるだけでなく、予測解析における kp も実施前に設定できなくなることが懸念される。

測定も行って参りましたが、これまでに衝撃波が観測されたケースはございませんでした。

・ケーブルの熱劣化につきましては、規制庁の研究になります。多段ケーブルトレイ火災の試験に関しましては、解析は規制庁ですが、試験自体は OECD/NEA の PJ で実施されたものになります。

・種々のパラメータを系統的に変化させた試験及び再現性を確認する試験を複数回実施しておりますので、試験結果の代表性に関しましては、問題ないと考えております。

・一般的には空気加熱割合 (kp) を一定にして解析が行われていますので、 kp を経時変化させながら解析を実施する手法につきましては、その妥当性や物理現象につきまして、丁寧に説明して参ります。

・爆発現象の解析には、種々の爆発解析が可能な商用コードである AUTODYN を使用しております。

20		④重大な見落とし（観点の欠落）がないか。	②③に述べた点は観点の欠落に相当するが、最終的な結論を大きく覆すほどのものではないため、重大な見落としはないと考える。	・拝承
----	--	----------------------	---	-----