

## 第5回材料技術評価検討会

### 議事録

#### 1. 日時

令和4年4月26日（火）10:00～11:24

#### 2. 場所

原子力規制委員会 13階 BCD会議室

#### 3. 出席者

##### 外部専門家

笠原 直人 東京大学大学院工学系研究科原子力国際専攻教授

松本 聡 芝浦工業大学 名誉教授

望月 正人 大阪大学大学院工学研究科マテリアル生産科学専攻総長補佐・教授

##### 専門技術者

釜谷 昌幸 株式会社原子力安全システム研究所

熱流動・構造グループ リーダー・主席研究員

下野 哲也 関西電力株式会社原子力事業本部

原子力発電部門 保全計画グループ マネジャー

##### 原子力規制庁

永瀬 文久 規制基盤技術総括官

青野 健二郎 技術基盤課企画官

田口 清貴 安全技術管理官（システム安全担当）

荒井 健作 システム安全研究部門 技術研究調査官

堀田 亮年 シビアアクシデント研究部門 技術参与

小嶋 正義 システム安全研究部門 上席技術研究調査官

森谷 寛 地震・津波研究部門 技術研究調査官

中村 均 システム安全研究部門 技術参与

西村 健 シビアアクシデント研究部門 技術研究調査官

鳥山 拓也 技術基盤課 技術研究調査官

#### 4. 議題

- (1) 安全研究プロジェクトの技術的観点からの評価（材料技術 事後評価）
- (2) その他

#### 5. 配付資料

##### 名簿

- 資料1 原子力規制委員会における安全研究の基本方針
- 資料2 今後の研究評価の進め方について（抜粋）
- 資料3 安全研究成果報告（案）
  - ・重大事故時等の原子炉格納容器の終局的耐力評価に関する研究（事後）
- 資料4 評価シート及び御意見シート
- 参考資料1 安全研究成果報告（案）説明資料

#### 6. 議事録

○永瀬規制基盤技術総括官 規制庁技術基盤グループ規制基盤技術総括官の永瀬でございます。

定刻となりましたので、第5回材料技術評価検討会を開催いたします。

先生方におかれましては、お忙しい中、検討会に御出席いただきましてありがとうございます。

今回の技術評価検討会では、令和3年度に終了した1件の安全研究プロジェクトの事後評価として、研究の手法や成果の取りまとめ方法等の技術的妥当性について、専門家の皆様から様々な御意見、御助言をいただきたいと考えております。どうぞよろしく願いいたします。

○青野企画官 技術基盤課企画官の青野でございます。

本日は、事務局として、私のほうで議事進行をさせていただきます。

本日の会合は、新型コロナウイルス感染症対策のため、テレビ会議システムを利用させていただきます。御意見・御質問では、挙手のマークを押していただきますよう、お願いいたします。一般傍聴につきましては、傍聴席の間隔を空け、席数を限定して行っております。

まず、外部専門家と専門技術者の方々を御紹介させていただきます。本日は、外部専門

家として東京大学の笠原先生。

○笠原委員 よろしくお願ひいたします。

○青野企画官 芝浦工業大学名誉教授の松本先生。

○松本委員 松本でございます。どうぞよろしくお願ひいたします。

○青野企画官 大阪大学の望月先生。

○望月委員 望月です。よろしくお願ひします。

○青野企画官 に御出席いただきでございます。

また、専門技術者として、株式会社原子力安全システム研究所の釜谷先生。

○釜谷専門技術者 釜谷です。よろしくお願ひします。

○青野企画官 関西電力株式会社の下野先生に御出席いただいております。

○下野専門技術者 下野です。どうぞよろしくお願ひします。

○青野企画官 まず、事務局より資料の確認をさせていただきます。

○鳥山技術研究調査官 技術基盤課の鳥山です。

資料の御確認となりますが、今回、議事次第、名簿、資料1～4を御用意しております。資料1としまして、原子力規制委員会における安全研究の基本方針、資料2としまして、今後の研究評価の進め方について、資料3としまして、事後評価の対象となる安全研究プロジェクトの成果をまとめた、安全研究成果報告（案）を御用意しております。

今回、事後評価対象となる安全研究プロジェクトは1件ございまして、重大事故時等の原子炉格納容器の終局的耐力評価に関する研究の安全研究成果報告（案）を御用意させていただきます。なお、本日の御説明は、資料3に基づくスライドで行わせていただきますので、参考資料として説明用のスライドを御用意しております。

また、資料4では、技術評価検討会後に御提出いただく評価シート及び御意見シートとしまして、外部専門家の先生方には、技術的観点からのコメントを記載いただく評価シート、また専門技術者の方々には御意見シートを御用意しております。

過不足等がありましたら、事務局のほうへお知らせ願ひします。

○青野企画官 資料の過不足等ございませんでしょうか。

よろしければ、事後評価に先立ちまして、評価の進め方等について取りまとめました資料1～資料4につきまして、事務局より簡単に御説明をさせていただきます。

○鳥山技術研究調査官 技術基盤課の鳥山です。

簡単な説明となりますので、資料の共有はせず、お手元の資料を御確認ください。

最初に、資料1、原子力規制委員会における安全研究の基本方針について御説明させていただきます。

安全研究の基本方針は、安全研究の進め方に関する基本的な考え方、安全研究プロジェクトの企画と評価等についての基本的な方針をまとめたものです。安全研究プロジェクトの評価については、基本方針の3ページに記載してございます。原子力規制委員会では、安全研究の的確な実施及び成果の活用を図るため、各安全研究プロジェクトの開始、終了等の節目において、事前評価、中間評価、事後評価を実施することとしております。

続きまして、資料2、今後の研究評価の進め方についてを御覧ください。こちらは安全研究プロジェクトの事前評価、中間評価及び事後評価の評価手法、評価項目及び評価基準を明確かつ具体的に定めたものです。これらの評価の中で実施する研究手法、成果の取りまとめ方法等の技術的妥当性評価については、外部専門家及び専門技術者から成る技術評価検討会を開催し、御意見及び評価をいただくこととしております。いただいた御意見、評価意見につきましては、原子力規制庁が行う総合的な評価に活用させていただきます。

このような技術評価検討会の位置づけや進め方を御理解いただき、原子力規制庁が行う安全研究の評価に御協力をお願いいたします。

次に、専門技術者の方々にお願いさせていただく御意見につきまして御説明させていただきます。

専門技術者は、産業界等の専門的な技術知見を有する者として、電力事業者、メーカー等に属する者を選定しております。専門的な技術的知見からの御意見について、本日の技術評価検討会の中で御意見ください。御意見シートに、いただいた御意見の内容等を御記入ください。その御意見を踏まえまして、外部専門家の方々にお願いさせていただく評価につきまして御説明させていただきます。

外部専門家の先生方に準備させていただきました評価シートを御覧ください。評価では、評価シートの評価項目というところに記載してございますような観点で、評価をお願いしたいと考えております。具体的には、国内外の過去の研究、最新知見を踏まえているか。解析実施手法、実験方法が適切か。解析結果の評価手法、実験結果の評価手法が適切か。重大な見落とし（観点の欠落）がないか。このような観点から評価をお願いいたします。

締切りは、両シートともに4月27日水曜日までとさせていただきます。

提出するシートにつきましては、事務局に送付いただければと思います。

今回の技術評価検討会での評価を踏まえ、今後、原子力規制委員会に諮る予定としてお

ります。

本検討会での評価についての御説明は以上でございます。

○青野企画官 本件につきまして、御質問、御意見等ございましたら、よろしくお願ひいたします。

よろしいでしょうか。よろしければ、安全研究プロジェクトの技術的観点からの評価を行わせていただきます。令和3年度に終了し、事後評価の対象となる安全研究プロジェクト「重大事故時の原子炉格納容器の終局的耐力評価に関する研究」につきまして、原子力規制庁長官官房技術基盤グループ、システム安全研究部門の荒井技術研究調査官及びシビアアクシデント研究部門の堀田技術参与から御説明させていただきます。

○荒井技術研究調査官 よろしくお願ひいたします。システム安全研究部門の荒井と申します。

本日は、重大事故時の原子炉格納容器の終局的耐力評価に関する研究、こちらにつきまして本研究で得られた成果等を御説明いたします。

本研究は、技術基盤グループの3研究部門であります、システム安全研究部門、シビアアクシデント研究部門、地震・津波研究部門が協力して実施したものです。では、次のスライドをお願ひいたします。

本日は、このような目次に沿って御説明いたします。次のスライドをお願ひいたします。

まず、本研究の背景及び目的について御説明いたします。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、こちらの解釈では、格納容器の破損防止対策の有効性評価としまして、重大事故時の圧力・温度が、格納容器の機能を維持できる限界圧力・温度を下回ることの確認を求めています。こちら有効性評価で、事業者のほうでは2Pd、設計圧力Pdの2倍、また200℃を限界値として設定しております。

ここで、格納容器の機能喪失に対する終局的耐力、機能を保つことができる最終的な耐力のことですけれども、こちらの評価で考慮すべき破損形態としましては、鋼製部材の過圧による局部破損、また電気ペネトレーション等のシール部樹脂部材の過温による分解・損傷がございます。

この局部破損についてですけれども、格納容器鋼材での試験データがほとんどないということ、また重大事故時のシール部の気密性や格納容器の局所的な過温による損傷についても、知見が少ないのが現状です。

そこで、本研究では、2017年度～2021年度の5か年におきまして、有効性評価、こちら

の格納容器の破損防止対策の有効性評価、こちらの妥当性評価に資するため、格納容器の過圧と過温に着目しまして、これらの限界条件について技術的知見を取得することを目的に実施いたしました。次のスライドをお願いいたします。

研究概要についてです。本研究は、格納容器の過圧、また過温に大きく二つに分けております。

まず、格納容器の過圧についてですけれども、3.1としまして、局部破損に関わる要素試験としまして、破損クライテリア、限界条件です、限界条件に関する材料データの取得を行いました。

次に、3.2、終局的耐力評価手法の検討といたしまして、先ほどの取得データに基づく評価手法の検討を行いました。この中では、有効性評価における限界圧力、2Pdの妥当性評価も行っております。

次に、格納容器の過温に関してですけれども、3.3としまして、電気ペネトレーション、こちらに着目しまして、その漏えいに対する限界を把握するための試験を実施いたしました。

また、3.4としまして、局部環境を考慮した終局的耐力評価、こちらにて局所的な過温、こちらに対する格納容器の閉じ込め性について、解析により評価いたしました。次のスライドをお願いいたします。

それでは、このスライドから研究期間を通じた主要成果について御説明いたします。まずは、局部破損に関わる要素試験、終局的耐力評価手法の検討について御説明いたします。次のスライドをお願いいたします。

まずは、要素試験の流れについて簡単に御説明いたします。試験片は全て切欠、試験部の中央に切欠、くぼみを有しているんですけれども、こちらの切欠の初期の曲率を変えた試験片での試験を実施いたしました。試験片の形状は、大きく分けて3種類ございまして、切欠付の丸棒試験片、切欠付の平板試験片、また切欠付の平板試験片なんですけれども、実厚相当の試験体、こちらを使用いたしました。また、平板試験片ですとか、実厚試験体では、切欠が全幅にわたるもの、また中央部のみのもの、この2種類を準備いたしました。それらを全幅切欠、部分切欠と申しております。

そして、まず試験の流れとしましては、切欠付丸棒試験片で局部破損に関する基礎特性のデータを取得いたしました。次に、平板試験片で、より実機形状に近い形状ですので、こちらで試験片、実機形状に近い試験片でのデータを取得いたしました。

最後に、実厚相当切欠付平板試験体、こちらを用いまして鋼製格納容器相当の厚さの試験体を用いて、丸棒試験片、平板試験片での取得データの妥当性確認を行いました。次のスライドをお願いいたします。

こちら要素試験での試験の概要についてです。まず、試験方法についてですが、先ほど申し上げましたとおり、切欠の初期の曲率R、こちらを変えた試験を実施いたしました。また、材料としましては、国内格納容器の主要鋼材、SGV480、SPV490等を対象といたしました。

また、試験中に切欠部の形状を連続観察しておりまして、丸棒ではシルエット画像、右の図で例を示しているんですけども、試験片の横から光を当てて、その影の画像を解析することで、試験中の切欠部の形状を測定いたしました。また、平板試験片では、切欠部にレーザーを当てて、その切欠部の形状を測定いたしました。

試験結果の整理についてですけれども。まず、引張試験により試験中の荷重、変位や、②のほうにあります切欠部のデータを取得いたします。

次に、③としまして、応力ひずみ線図、①で得られた応力ひずみ線図を基に、弾塑性FEM、こちらによる追解析を実施しまして、試験中の応力三軸度等の値を算出いたします。

そして、最後に、応力ひずみ線図の屈曲点、応力が急激に減少する点です、こちらに着目しまして、そこでのひずみ、限界ひずみや、限界応力指標という本研究で提唱したものなんですけれども、相当応力と平均応力の和、こちらの値について応力三軸度により整理いたしました。次のスライドをお願いいたします。

こちらが先ほどの流れで、試験結果、応力三軸度により整理したグラフとなっております。左が限界ひずみによる整理結果、右が限界応力指標の結果となっております。グラフ中のRなどに数字が書いてありますけれども、こちらが切欠部の初期の曲率を示しております。また、このグラフにおいてシンボルが丸のものが丸棒、四角が平板の全幅の切欠、ひし形が平板部分切欠の結果となっております。

また、青のシンボルが試験片内部から破損した試験片での屈曲点、局部破損の開始点でのデータ、また赤の結果に関しましては、破損形態が異なっておりまして、切欠の表面から亀裂が発生して破断した試験片につきまして、その亀裂の発生点、こちらを同じグラフに載せております。

また、参考としまして、黒の実線で局部破損防止規定の一つであるASMEの、こちらの線図を合わせて載せております。こちら両方ともSGV480の母材での結果を例として示してお

りますが、国内格納容器の主要鋼材につきまして、局部破損の開始条件を示したデータは  
このように得られました。

また、限界ひずみ、限界応力指標により結果を整理しまして、特に右側の限界応力指標  
では、丸棒でほぼ一定となるような結果を得られました。次のスライドをお願いいたしま  
す。

次に、試験片ごとの比較についてです。まず、左のグラフを御確認いただきますと、こ  
ちらの丸のシンボルです。こちら、まず丸が切欠付丸棒、この青い丸の結果については、  
ASMEのこちらの線図を上回る結果となりました。また、切欠付の平板のうち、初期曲率R  
が大きいもの、こちら青の四角とひし形で、Rが5ですとかRが15、こちらのものについ  
てもASMEの線図を上回っております。

最後に、切欠付の平板のうち、初期曲率Rが小さいもの、赤のRが1ですとか2のものにつ  
いて、こちら亀裂の発生点で示しておりますが、こちらASMEの線図より下ではあるんです  
けれども、こちら右側の応力ひずみ線図、こちらを御確認いただきますと、上からRが1、  
2、5、15の結果となっておりますが、公称応力の最大値、この一番上の部分に関しましては、  
Rが大きいものの値をRが1とか2のものが上回っております。そのため、格納容器の構造健  
全性という意味では、問題ない結果だというふうに考えております。次のスライドをお願  
いいたします。

先ほどから申し上げている破損形態の違いについて御説明いたします。これらの写真は  
引張試験を途中で中断いたしまして、縦方向に試験片を切断した、その断面の切欠部を観  
察したものの結果となっております。中断するタイミングに関しましては、内部から破断  
するものに関しては、先ほどの屈曲点、こちらの直前。亀裂が発生するものに関しまして  
は、亀裂発生直後、こちらで中断しております。

まず、上の切欠付丸棒試験片につきましては、切欠中心部から破損したんですけれども、  
写真でも中心部にボイドの集積が確認されました。

次に、下の平板試験片のものなんですけれども、左が初期曲率Rが大きいもの、こちら  
せん断型の破壊を起こしたんですけれども、断面写真でも斜め方向にボイドが集積してい  
るよう観察されました。また、曲率が小さいもの、右側の写真のものは切欠の両側から  
亀裂の発生を確認できました。次のスライドをお願いいたします。

次に、実厚試験と有効性評価の限界値の妥当性評価、こちらについて御説明いたします。  
右に実厚試験体と小型の平板試験片、こちらの比較結果を示しております。右に延びてい



る線、この黒と赤の二つの線が実厚の試験体。左側の線が小型の試験片の結果となっております。こちらの応力の最大値を見ていただければいいかと思うんですけども、御覧になって分かるように、実厚試験体のほうは小型の試験片に対して高応力側、こちらに位置しております、試験範囲においては、小型試験片は保守的な結果を示すというような結果が得られました。

また、同じグラフに2Pd、こちらに対する応力値として、一次応力制限の値、320MPaとなっておりますけれども、こちらの値を赤の横線で示しております。こちら試験片の最大公称応力はこの値を上回っております、局部破損は2Pd、こちらよりも大きい圧力で生じると評価いたしました。次のスライドをお願いいたします。

こちらが局部破損を詳細に評価するための手法について御説明いたします。こちら詳細な評価手法といたしましては、評価モデルはガルソンモデル、こちらを使用いたしました。こちらガルソンモデルについて、破損直前にボイド体積率が急上昇するような項を追加したものを追加・修正いたしております。こちら左の図で、下の線が急激に立ち上がっているものがボイドの体積、ひずみに対するボイドの体積率。上が、先ほどから言っている限界応力指標を示しております、R2、R5、R20の結果の線を示しております。上の線が急激に落ちる点、こちらは破損の開始点に当たるわけですけども、そのタイミングで下の線、ボイド体積率が急上昇するように、こちらのモデルでは設定しております。

このモデルを使用しまして、試験結果と比較したものが、右の図となります。シンボル付きの線が試験結果、シンボルなしの線が解析結果となっております。こちら赤丸で示した点です、こちらの箇所が破損の開始点を示しております、屈曲点と何度も申し上げております、応力が急激に下がる点です。こちらを示しているんですけども、この荷重が急激に下がる点、こちらが解析でも試験と同様に再現することができました。次のスライドをお願いいたします。

こちらから3.3としまして、電気ペネトレーションのシール挙動試験、こちらについて御説明いたします。次のスライドをお願いいたします。

こちら、シール挙動試験の概要についてですけども、樹脂シール部からの損傷について、格納容器の中で数が多い電気ペネトレーション、こちらに着目しまして、そのシール性の限界、こちらを確認するための試験を実施いたしました。こちらは先ほどから申し上げているとおり、重大事故時の高温・高圧環境下での電気ペネトレーションのシール性を確認するための試験です。

こちら対象としましたのは、現行BWRプラントの低電圧用モジュール、制御・計装用と動力用、こちらを模擬した試験体を使用いたしました。また、シール部の材質はエポキシ樹脂となっております。

また、試験条件といたしましては、一次シール側、こちらを200℃、0.854MPaで168時間（7日間）保持した後に、これでシールが破損しなければ350℃まで昇温するというような条件としております。

また、350℃で24時間経過後も漏えいしない場合、さらに一次シールが漏えいしなかった場合は、400℃まで昇温するというような試験条件といたしました。

また、事前劣化といたしましては、 $\gamma$ 線を800kGy、こちらの事前照射あり・なしで実施いたしております。

こちら試験結果の見方としましては、一次シールと二次シールの間に挟まれた、このリークモニタ、ここの部分の圧力の上昇、下降でそれぞれ一次シール、二次シールの漏えいを判定しております。次のスライドをお願いいたします。

左の図が試験結果の例として、制御・計装用モジュールの事前照射ありの結果を示しております。赤、黄色、青のこの三つの点線が温度、グレー、黒の二つの実線が圧力を示しております。こちら事前照射ありの制御・計装用モジュール、また動力用モジュールのほう、両方とも200℃、168時間では一次側、二次側とも漏えいいたしませんでした。また、その後、350℃まで昇温すると二次側まで漏えいしたといった結果となりました。

次、事前照射なしの結果ですけれども、事前照射なしの場合は、モジュールの二次側までの漏えい温度が制御・計装用で400℃、動力用で350℃という結果となりました。そのため、有効性評価の限界値と設定しております200℃、こちらに対して十分に余裕があることを確認できました。次のスライドをお願いいたします。

こちらのスライド、3.4項、局部環境を考慮した終局的耐力評価につきましては、一時的にシビアアクシデント部門の堀田に説明者を替えさせていただきます。次のスライドをお願いいたします。

○堀田技術参与 シビアアクシデント部門の堀田です。

それでは、17ページ目の説明をいたします。炉心損傷を伴う重大事故時に圧力容器が破損した場合に、高温の気体が格納容器に放出されることが考えられます。その放出位置や、その時点の圧力容器の温度や圧力によっては、格納容器に局所的な部分で高温になる可能性があります。こういった局所温度を総合シビアアクシデントコードなどで十分に評価で

きないことから、この研究では、こういった局所温度の事象を詳細に評価することを目的といたしまして、複数のコードを組み合わせることで評価を検討してまいりました。

ここでは3種類の解析コードを用いておりまして、プラント規模でシビアアクシデントの事故進展を評価するMELCOR、3次元の熱流動解析コードFLUENT、そしてフランジ等の構造変容を評価するための有限要素法の構造解析コードABAQUS、この3種類でございます。

今回の御説明では、これらを組み合わせた手順による評価を進めますが、このうち4番目、右の4番目に(4)にあります、格納容器全体系を対象とする伝熱流動解析及び(5)のトップヘッドフランジのギャップ近傍を対象とする伝熱流動解析について主に説明いたします。次のスライドをお願いします。

ここでは、格納容器全体系を対象とする3次元の伝熱流動解析モデル、この構造を左に示しています。これによる格納容器内側バウンダリの温度分布の解析結果を右に示しています。

まず、左でございますけれども、このモデルはBWR-5Mark IIの形状を模擬しておりまして、内部に圧力容器の外側境界の壁面、外側の壁面を考慮しています。MELCORを用いた事故進展解析というのをあらかじめやっております、その中で圧力容器の伝熱解析をやって、それをFLUENTに反映することによって、圧力容器の外側バウンダリの熱流束分布というものを求めます。これは前回の中間報告で御説明したとおりであります。

今回は、この圧力容器外側の熱流束を境界条件として、格納容器の内側からの熱源として境界条件として与えます。過渡事象での高温注入失敗後の減圧というものを、ここでは典型シナリオとして考えています。ここで炉心が高温で推移するわけですが、シビアアクシデントの現象防止の観点から、溶融物が勢いよく高圧で噴出して液滴化するという事になって、格納容器が加熱されるDCHという現象ありますけれども、これを防ぐために圧力容器を強制的に減圧するという操作を行います。ここでは、それを仮定するという事でございます。これによって原子炉容器に接続する配管やガスケットなどを含めて、破損するような圧力温度に至らない結果というのが詳細な評価で示唆されております。

一方で、BWRの場合は、格納容器の上部というのは、バルクヘッドという台座で仕切られていまして、非常に狭い空間になっています。ここにはスプレイの影響は及びにくいということと、狭い空間なので比較的高温ガスがこもりやすいという特性がございます。東京電力の福島第一原子力発電所の事故における格納容器からの放射性物質の大量放出の発生箇所としても、こういった箇所に属するトップヘッドフランジというものが可能性とし

て指摘されていることもあります。

そういったことから、本検討では、前段の説明にありました、発生確率の大きさによらず、格納容器の上部が高温になるといったシナリオを仮定しまして、圧力容器頂部に接続する配管に附属するフランジのガスケットから高温のガスが格納容器内に流出するといったことを仮定します。

格納容器に流入する高温気体というのは、MELCORを使った事故進展解析で組成を求めます。これをFLUENTの格納容器モデルに与えています。解析時間は、こういった高温の気体の流入が格納容器の気体の流入が落ち着く1,800秒までとしております。

格納容器の内面温度はミラーの頂部において600℃を超えているというのが、右側のグラフから分かります。トップヘッドフランジの相当部分では、周平均では400Kを超えているといった領域になっています。次、お願いします。

さらに、トップヘッドフランジのギャップの近傍の熱的な状況を解析するために、ここではトップヘッドフランジのギャップを中心とした軸方向領域の温度場を解析します。ここでは、まずフランジのギャップがどの程度開くかということ、ABAQUSという構造解析コードによって求めています。このモデルは軸対象でして、トップヘッドフランジのボルトで初期のトルクを考慮いたしまして、フランジの台座の部分と格納容器のシェルの部分をモデル化した軸対象の条件になっています。温度と圧力を与えて、格納容器が変位して、こちらの左側の図でいくと、左側が格納容器側になりますが、ここにギャップが開くと。ボルト側の一番右側のボルトの右のほうは閉じているという体系です。これで例えば200℃、2Pdという安全評価上の限界値の解析しますと、左側の開口部分が2mm程度開くという結果が想定されます。

この結果を受けまして、右側のこれはFLUENTによる軸対象のギャップ近傍のモデルですけど、ここでギャップを2mm開けた解析というのを行いました。感度解析として右側の外側は閉塞している場合と、プラントには格納容器の設計漏えいというのが想定されますので、例えば0.5%/dayという格納容器基準の漏えい量が仮定されますが、そういった設計漏えいを仮定した場合と。あと、完全に外側大気圧で内外圧差で流れてしまうという、非常に厳しい状態を想定して、3種類の解析を行いました。

結果としては、この右側の下の図のほうには、これは設計漏えいのケースですけども、設計漏えい程度の漏えいを仮定した場合には、たとえ局所的に高い温度場が上部区間にあったとしても、ギャップ部分にはそれほど高温の気流は流れてこないということで、ギャ

ップ近傍の温度というのは、およそ300Kぐらいに落ち着くので、設計限界温度ぎりぎりということになります。

ただ、これが何らかのきっかけでギャップがさらに開いてしまうと、ここに一気に高温気流場が流れてきますので、それによってこの部分というのは非常に高温になって、場合によっては600Kを超えるといった解析結果も得られています。

以上の解析の結果、格納容器の上部の部分に温度の非一様性が非常に顕著になると、漏えい箇所の位置と、そういった高温の雰囲気領域の位置関係によっては、ギャップの閉塞状態によっては、そこに流れが集中して、ガスケットなどの有機シール部材というのが急激に破損していくといったモードが示唆されるといったことでございます。

以上でございます。

○荒井技術研究調査官 それでは、また荒井に戻ります。

次のスライドをお願いいたします。こちらでまとめとなります。格納容器の過圧に関してですけれども、国内格納容器の主要鋼材、こちらに対しまして切欠付試験片を用いました引張試験により、局部破損の開始条件を示す材料データを取得いたしました。

また、材料データのASME線図との比較を行いました。さらに、限界圧力の妥当性確認を行いました。局部破損は2Pdより大きい圧力において生じると評価いたしました。次のスライドをお願いいたします。

次に、格納容器の過温についてです。電気ペネトレーションは350℃以上で漏えいしております。有効性評価の限界値として設定しております200℃、こちらに対して十分に余裕があることを示しました。

また、局所的な過温に関しましては、格納容器のトップヘッド区画、こちらなどで局所的に200℃を超える領域があっても、トップヘッドフランジのガスケット温度の限界温度に到達しないと、そういったような結果が得られました。次のスライドをお願いいたします。

成果の活用についてですが、本研究では、こちらの今後の見通しのほうにちょっと書いているんですけれども、有効性評価における限界圧力・温度に対する裕度を改めて評価できましたので、規制業務、こちらへの当面の反映事項はございませんが、将来的にさらに詳細な評価が必要となった場合には、本研究で得られた成果の活用が可能と考えております。次のスライドをお願いいたします。

成果の公表に関しましては、査読付の論文を2件、国際会議でのプロシーディングスを1

件、国内学会での発表を2件行っております。次のスライドをお願いいたします。

最後に、成果目標に対する達成状況について示します。まとめで示しましたように、格納容器の終局的耐力の評価手法及び限界条件に関する以下の知見、こちらを得られましたので、目的を達成したと考えております。

以上で御説明を終わりにいたします。ありがとうございました。

○青野企画官 それでは、質疑とさせていただきます。質疑につきましては、最初に専門技術者の方々から御質問、御意見をいただき、次に外部専門家の方々から御質問、御意見ををお願いいたします。なお、御発言の前に、所属とお名前をおっしゃっていただきますようお願いいたします。

それでは、まず、専門技術者の方々から御質問、御意見ををお願いいたします。

釜谷さん、お願いいたします。

○釜谷専門技術者 ちょっと確認ですが、専門技術者は私でよろしいですね。

○青野企画官 そうです。お願いします。

○釜谷専門技術者 ありがとうございます。大変良い研究で、立派な成果を上げられているというふうに認識します。

少しちょっと確認させていただきたいのですが、まず、格納容器の過圧の研究について、最終的に結論は、局部破損は2Pdよりも大きい圧力において生じると評価されたという結論を得られておりますが、その根拠になったのが、根拠といいますか、それを示されたのが、先ほどの御説明いただいたスライドの11番だというふうに認識します。今回、研究の主眼は、延性亀裂の発生のクライテリアだというふうに認識はしているのですが、その部分とこの結論というのは何かリンクしているのですか。というのは、実際には最高圧力を公称の応力を見ながら先ほどの結論を導いたように思われるのですけれども、その結論を導く上で、この延性亀裂の発生の検討はどのように寄与されたのかというところは、少し不明確かなというふうに思ったので、質問させていただきました。

○荒井技術研究調査官 御質問ありがとうございます。こちらですけれども、御指摘のとおり、こちらの2Pd、こちらの制限を満足するのかということに関しては、スライドの11ページ、こちらのもので見ております。

こちらに関しましては、基本的に最大公称応力で評価しているんですけれども……、すみません、ちょっと説明を替わります。

○中村技術参与 システム安全、中村のほうから回答させていただきます。

今の釜谷先生のコメントにつきましては、ごもっともなコメントだと思うんですけども、その前の9ページのところに限界ひずみ線図が書いてございますが、試験片ベースですと、曲率が小さい場合には、切欠の表面から延性亀裂が進展して破壊する、そういうことが実験的に分かっております。残念ながら、亀裂が入っている状況ですと、そのときのリガメントとしての破壊条件をどの時点で決めるかということが、ちょっと非常に苦慮いたしました。

それについては、一応バックアップとして、損傷力学解法なんかも備えてはいるんですが、2Pdを超えるか超えないかという観点からは、今の11ページ目のほうにあります公称応力ベースで評価すると、比較的余裕があるという結果が出ましたので、この限界ひずみ、限界応力指標に基づく評価と、パラレルにもう一個公称応力ベースでの評価を実施して、2Pdに対する保守性については評価したということで、ちょっと使い分けた評価をしています。

○釜谷専門技術者 ちょっと私の解釈で重ねさせていただくと、最大の、公称応力がピークを打つ前に亀裂が出てしまわないかどうかというところが、一つ懸念になるというところで、それを確認しているというところが、この研究の大きなところかなということでしょうか。

○中村技術参与 中村ですが。

今、釜谷先生がおっしゃられたとおり、この11ページ目の図で、一応、亀裂は公称応力線図で最大荷重を超えた辺りから出ておまして、今回、実厚も含めた試験をやっておりますが、2Pdからのところで亀裂が入り始めるというような試験結果はなかったです。

○釜谷専門技術者 ありがとうございます。

もう1点だけ、よろしいですか。もう一つちょっと気になっていたのが、今回、表面から亀裂が出たということで、非常にそれでクライテリアがかなり違うというのは、非常に有用な知見だというふうに思います。

一方で、今回の取扱いとして、表面から出る場合は、亀裂発生点を一つの損傷の判断基準にされて、内部から亀裂が出るときは屈曲点を取っておられるという話で、これは同じと扱ってよろしいんですか。言い換えると、表面に亀裂が発生しても、屈曲が生じることはなかったということを考えると、そもそも屈曲が起こる前に、いわゆる表面亀裂に相当するものが内部に発生していた可能性も考えながら、ちょっと解釈としては幅広に構えたほうがいいのかというふうに、ちょっと感じました。

以上です。

○中村技術参与 システム安全の中村ですが。

表面から亀裂が出た場合の扱いなんですけど、先ほどこの点で評価せざるを得ないということをやっと申し上げましたが、一応、過去の局部破損に関する研究を見ましても、一応、局部破損については、内部から発生した場合、表面から発生した場合、屈曲点というのは内部に破損が発生した時点ということですので、破壊が発生した時点という基準で捉える限りは、屈曲点で見ると、表面での発生点で見ると、基本的には同じ基準で見ているということで、今回の評価では、限界ひずみ線図上では表面に亀裂が観察された時点で局部破損の開始というふうに整理したという次第です。

○釜谷専門技術者 整理はそれしかないかなというふうには私も思うのですが、実際に物理的なクライテリアという考え方で表面と内部は違うというふうに考えると、もともと見ている発生点の定義が違うので、もしかしたらクライテリアとしては同じもので、表面と内部では単に見えている現象が違うだけという可能性はないのかなというのはいちよっつと。そこまで含めた考察にされたほうが客観的だなというふうに感じた次第です。

○中村技術参与 今回のコメント、ごもっともだと思うのですが、一応、実は今回、亀裂の進展を含めた試験と解析もやっております、そちらのほうでは、今回、応力基準の破損クライテリアというのをこの中で提案したわけですが、一応亀裂材のほうへの拡張もどうもできそうであるというような結果が出ておりますが、現状、未発表ですので、今回の結果には含めなかったというような次第です。

○釜谷専門技術者 以上でございます。ありがとうございます。

○青野企画官 ありがとうございます。

続きまして、下野さん、お願いいたします。

○下野専門技術者 関西電力、下野です。

私自身は電気・計装設備のエンジニアですので、今回の研究で考えますと、電気ペネトレーションのシール性能について意見を申したいと思います。

まず、今回の過温時の電気ペネトレーションのシール機能の限界条件をデータ採取するというのは、非常に有意義な研究だと私たちも思っています。我々事業者は、どちらかというと想定した条件において、その機器がもつかというところに着眼点を持った試験をします、限界はどこかという視点でのデータというのは、有意義だと私も思っています。

また、試験方法を拝見しまして、適切だと思っています。特に、私が思ったのは、今回



電気ペネトレーションの二次側に保温材をつけずに既往のNUPECの成果よりも実機条件に近づけたといったところが記載としてありまして、やはり、こういったシール部全体としての圧力限界はどこにあるかを検討するという試験においては、実機に近づけたデータを取ったというところは適切な配慮だったなと思っています。

1点だけ、私の理解が正しいかどうかを確認したいので質問させてください。今回、ペネトレーションの温度条件を見ると、200℃で1週間かけた後、一度350℃に上げて24時間保持して、そこからさらに400℃に上げています。この350℃という温度の狙いをちょっと確認したいなと思います。以前のデータ、国内外とか見ていくと、大体BWRだと低圧のペネだと330℃とか、そのあたりでは破損データはあるのかなと思っています。

また、材料ですね。有機材の材料が放射線のひずみによる効果が大体330℃ぐらいで落ちるよといったことも既往の成果としてあると。そういったことを踏まえると、既往のデータよりも保守性、今回減らして実機に近づけるという観点から、350℃という温度帯でやったのかなと、私は読んで受け止めたのですが、その受け止めでよいのか。それとも、もっと別の350℃という温度で24時間保持した試験としての狙いがあるのかといったところをちょっと教えていただければと思います。

以上です。

○荒井技術研究調査官 御質問ありがとうございます。

350℃で電気ペネの試験をした狙いといいますのは、先ほど下野さんのほうで御指摘いただいておりますとおり、NUPECでの試験、こちらの過去の試験の結果を参考として実施しております。

また、エポキシ樹脂またOリングの分解開始温度というものを熱重量示差熱同時分析により測定しておりまして、エポキシ樹脂の分解開始温度が310℃程度であったことも同時に考慮して決めております。

以上です。

○下野専門技術者 状況よく分かりました。ありがとうございます。

私からは以上です。

○青野企画官 ありがとうございます。

続きまして、外部専門家の方々から御質問、御意見をお願いいたします。

笠原先生、お願いいたします。

○笠原委員 ありがとうございます。今回の御発表、前半の局部破損の話と後半のペネあ

るいは格納容器のシステムの話に分かれますが、まず、最初に前半の局部破損の部分についてのみ質問させていただきます。時間がありましたら、あとで別のテーマの質問をさせていただきます。

この局部破損につきましては、国内外でそんなに研究が最近多くなされているわけではないと思います。その中で、大変精力的に研究されて貴重なデータを出されていると思います。敬服いたします。

それから、この研究のまず最初の目的は、現行のクライテリアが保守的であるか、それを検証することであったと思います。これにつきましても、先ほど釜谷さんからの御質問もありましたが、公称応力という簡易な方法ではありますが、保守的だということを示しているということも理解できました。

一方、せっかくこれだけ詳細なデータが得られましたので、これを保守的であったという結論にとどまらず、より保守的であるならば裕度はどのぐらいであったと。さらに、今後の規制というのは、リスク情報活用ということはキーになっております。特に設計を超える条件、BDBEにおいては、IAEAも保守的評価からベストエスティメイトということを推奨していると思います。将来というか、もう既にリスク情報活用という方針に舵を切っているわけですが、ここを推進していくためには、実際の現象はどうであったか、実挙動を予測する研究というのが重要になってくると思います。そういう意味で、ややアカデミックな質問になってしまいますが、実際の挙動はどうだったという観点の質問を少しさせていただきます。

具体的には、資料の9ページを使って御質問させていただきたいと思います。左側の図を見ると、赤い表面からの破損と、それから右上の内部からの破損では、やはり傾向が違って見えますよね。その理由というのに、まず一つは、現象そのものは同じであるのかどうかと。上のタイトルに局部破損評価法というふうにあります。ですので、まずはこの現象が局部破損という破損モードであるのか。あるいは、もう少し言うと、局部破損という言葉も少しずつ人によって捉え方が違うように思いまして、ここで言っている局部破損というのはどういう現象を指しているのか。その定義を少しみんなと共有しながら、その上で、この二つの現象は現状で同じ破損モードと考えているのか、あるいは、少し違うのではないかと。違うのであれば、まだ少し研究余地があるのか。その辺について、まず最初に御質問させていただいてよろしいでしょうか。

○中村技術参与 システム安全、中村です。

先ほどの釜谷さんの御質問とも関係する御質問かと思いますが、一応10ページ目のほうに破損形態の断面写真が載せてございますが、内部から破損する場合、あるいはせん断型の破損の場合には、破損の直前にボイドが急成長しまして、それが連結して破損するという形態をとります。しかしながら、表面から入る場合には、10ページの写真にありますように、表面からせん断型の延性亀裂が塑性流動に伴って進行して入るという形を取りまして、ボイドの発生というのはございません。そういった意味で、破壊メカニズムは違うというふうに考えています。ただし、限界ひずみ線図上は、過去の他者の研究例も取りましても、破損の開始点で捉えるという評価でやらざるを得ないので、こういう評価を実施したと。

さらに、これ以上やろうとしますと、先ほど釜谷さんの御質問にもありましたけども、延性亀裂の進展を含めた評価と絡めて、表面から亀裂が入ったときにどこで壊れるかというようなことをやらなくてはいけないのですけども、それは今回の研究範囲では実施していないということです。

○笠原委員 ありがとうございます。評価法の御質問は、またこの後させていただきますので、まず、現象そのものに的を絞りますと、局部破損というのは局部から壊れるということですよ。そこは外部であろうと表面であろうと、局部から壊れると。ただ、その局部一点に着目したときに、両方同じ延性破壊と思っているのか、あるいは、違うと認識しているのか。もし違うのであれば、その違いを正確に表す言葉であるとか、あるいは、最近の内外の研究では、それをどういうふうに扱っているか。その辺が気になるところです。その認識が共有されないと、なかなか次の評価法、正しいかどうかという議論に行かないように思うのですが、この写真の二つは現象として違うという認識なのか、同じと考えているのか。いかがでしょうか。

○中村技術参与 その点につきましては、先ほど申し上げたように、違う破壊メカニズムが働いているというふうに結論せざるを得ないと思います。

○笠原委員 ありがとうございます。ちょっとしつこいようで恐縮なのですが、もし違ふとなれば、やはり、これは違ふのだということに関係者で共有する必要があると思います。それぞれどういう呼び方をされて区別されているのでしょうか。

○中村技術参与 特に、この研究で破壊モードの違いについては、新しい定義はしておりませんが、表面から入る場合には、塑性流動に伴う亀裂の発生、そういうような言い方が適切ではないかなというふうに個人的には思っています。

○笠原委員 ありがとうございます。こういう貴重なデータが得られたということで、ぜひこのデータそのものは内外の専門家と共有して、もし違うという認識であれば、外部の方とも共有できる名前をつけて区別、これからしていくのか。名前というのが必要かなど、まず思いました。ちなみに局部破損という言葉は何となくみんな使われていて、同じ局部破損なら統一評価法でなければいけないという議論にもなっていますので、もし違うのであれば、そもそも統一評価というのは難しいわけですし、その出発点の議論かなと思います。

まず、1点目は以上です。

次に、もう一点よろしいでしょうか。

○青野企画官 よろしくお願いたします。

○笠原委員 やはり、9ページの図なのですけども、左の図の縦軸の限界ひずみ  $\varepsilon_L$ 、L というのはローカルという意味ですかね。ローカルひずみ。

○中村技術参与 リミットという意味でLをつけています。

○笠原委員 そうですか。失礼しました。なかなか言葉は難しいのですが、ここで言っているひずみは公称ひずみのように平均的なものではなくて、まさに破壊点でのピークひずみと考えてよろしいでしょうか。

○中村技術参与 一応これは弾塑性FEMによって求められた破壊点における相当塑性ひずみをプロットしています。

○笠原委員 相当塑性ひずみ。FEMで求められた点のピークひずみですね。評価断面を使ったようなものではなくて。

○中村技術参与 そのポイントですね。内部から行った場合には、その中心点の要素の相当塑性ひずみ、表面から行った場合には、切欠底の要素の相当塑性ひずみをプロットしています。

○笠原委員 ありがとうございます。そうすると、ここからはちょっと、私の拙い経験からの想像も入ってしまうのですが、曲率半径が1mmとか小さくなってノッチのような形状になって、なおかつ平板で薄肉ですと拘束も弱いので、かなりノッチ底のピークひずみが大きくなるように思うのですが。この図を見ると、あまりひずみは大きくないところで壊れているということになるのですね。破壊したときの表面、まさに破壊点でのひずみというのは、こんな小さい値だったのでしょうか。

○中村技術参与 その点は、報告書のほうには入れたのですけども、切欠から亀裂が入る

限界条件を求める計算が米国のハンコックとか、国内ですと阪大で実施されておりまして、大体ほぼ同じような応力三軸度と限界ひずみのところで発生しておりまして、この表面からの発生状況につきましては、他者の研究結果と似たような結果が出ているというふうに思っています。

○笠原委員 薄肉だったり平板だったりすると拘束は小さいですので、応力三軸度が小さくなるのはそのとおりだと思います。ただ、応力三軸度は小さいということは拘束も小さいので、ひずみが拡大しやすくなると思うのですが、ここではそのひずみもあまり大きくないのは、想像と違ったので質問していたわけです。逆に言えば、あまりひずみが増えないのであればメッシュを細かく切らなくてもいいのかなとか、この辺の議論は、この後、局部ひずみを評価するFEMモデルだとか、そういう議論につながる部分で、少し興味があるところです。

取りあえず終わりにしておきます。ありがとうございます。

○青野企画官 ありがとうございます。

続きまして、松本先生、お願いいたします。松本先生、申し訳ございません。マイクが入ってございません。

○松本委員 すみません、松本でございます。

私の専門が電気、それから電気絶縁材料ということなのですが、3.3の電気ペネトレーションについて、先ほど下野さんからお話ございましたけれども、シール挙動でデータをお示ししていただいて、御説明資料の15ページに表としてまとめておられるのですが、寿命評価とか信頼性評価という試験のやり方について、ちょっと御質問させていただきます。といいますのは、先ほど御質問があったのですが、200℃で168時間でしょうか、かけて、その後、350℃、400℃というふうに試験をされているのですが、寿命評価のやり方として長時間試験というもの、電気のほうではよくやるのですけれども、そういった場合に、一定の条件でずっと時間を稼いで破壊するところを求めるというのを幾つかの試料を使ってするということが一般的かと思うのですね。それに対して、今回の試験装置では、一つの試料を200℃、168時間かけた後に温度を上げて試験するというやり方になっているかと思うのです。こういったやり方でやりますと、信頼性とか寿命評価というのが、ちょっと評価が非常に難しくなってしまうのではないかなということをお慮しております。なので、今回200℃では問題なさそうだということなのですが、こういった場合の根拠になる理論的な背景といたしまして、どうして劣化が起こるかというところをまとめた考え方として、

私どもではアレニウスの式とかアイリング-ポランニーの式というのがあるのです。これは熱的平衡条件と力学的な平衡条件、それから化学的な平衡条件を仮定しまして、これをベースにアレニウスの式、あるいはアイリング-ポランニーの式というのがあるって、これに基づいて一定の条件で特定のパラメーターのみを評価するというやり方で寿命評価をするというやり方をするのが一般的かと思うのです。今回、こういった手法を取られた背景、試料が1個しかないのでこういうふうに行ったということもあるのかもしれませんが、もしそうであるとすれば、さらに試料の個数を増やして個数のばらつき等も見ることがあるのではないかなということ。私の質問は、信頼性評価の基本的な考え方についてお尋ねしたいと思います。よろしくお願いいたします。

○荒井技術研究調査官 コメントありがとうございます。先生のおっしゃること、そのとおりだと思っておりますけども、やはり、電気ペネトレーションのモジュールを準備するに当たって、なかなか数が準備できないというようなことが、費用的な問題だったり、時間的な問題だったりというものがございまして、今回モジュールとしましては、4体準備いたしております。そちらの中で、事前照射がありなものとなしなもの、また、制御・計装用モジュールと動力用モジュールのもので実施しております。

今回の研究の一番の目的が、寿命評価ということで限界がどこにあるかということよりも、まずは200℃、こちらを満足できるかどうかという視点で確認したいと思っておりますので、このような試験としてさせていただきました。

以上です。

○松本委員 その場合に、168時間という時間設定の根拠はどこにあるのでしょうか。

○荒井技術研究調査官 この168時間についてですけれども、基本的に原子炉格納容器の破損防止対策の有効性評価におきまして、7日間以上での評価をすることとなっておりますので、この中で限界条件200℃、2Pd程度ということで7日間保持したという条件を設定しております。

○松本委員 承知いたしました。そういったことで168という数値が決まっているということですね。承知いたしました。ありがとうございます。

私からは以上です。

○青野企画官 ありがとうございます。

続きまして、望月先生、お願いいたします。

○望月委員 大阪大学の望月です。

御説明、種々丁寧にありがとうございます。中間評価のときもそうだったのですが、とても丁寧に基本的なところから研究を進められていて、今回は最終的な成果まできっちりと出されたということに、まずは敬意を表します。

その上で、もう既に釜谷先生と笠原先生、あと一部、松本先生のコメントもそうなのですが、もう私が聞いたかったこと、ほぼ質問いただいていますので、特に内容についてはそんなに踏み込まなくていいのかなと思ったりしています。実は、聞いたかったことというよりは私が回答したかったことといったほうが正解だったかもしれないのですがね。特に、今日の出だしから始まりました釜谷さん、笠原先生のところでもいろいろ議論、やりとり出ていました延性亀裂の問題。ここ、本当にとっても基本的なところにもかかわらず、実は国内、海外含めてあまりこの基本的、基礎的な研究がなされていなくて、特に国内に関しては、多分名前挙げても一昔前の名古屋大の大塚先生のグループ、それから、さっき中村さんから少し出ましたけど、阪大の僕の親分の豊田先生のグループ。もうそのあたりしかデータがないような状況で、豊田先生のグループということで私も、今も、さらに若い頃には、本当に生データを見ながら何やかんやと言いながら進めていましたが、今回この安全研究の中で、本当に基本的なところからきっちりやっていただいて、今のやりとり、回答という意味では僕が答えたかったこともあるのですが、出ている情報そのものという意味では、過去のデータとも比べながら、海外等の内容も踏まえながら、あと最新の知見等も踏まえながら、とてもいい感じに出てきているというのが正直なところですよ。ですので、今回の最終報告という終了評価という意味でも、今日この段階、聞かせていただいたところでコメントするという意味では、とてもいい評価を出せるというふうに感じておりますし、この後、また書面で提出するものも、その方向で書きたいなと今は思っているところです。

その上で、安全研究としてということで、基本的なところもそうですし、成果の展開先ということも、これについては笠原先生からもコメントありましたとおり、ぜひともリスク情報活用というようなところを意識しながら、最終的な報告書だけでなく、さらにその先ですよ、そこに意識を持って進めていただければとてもありがたいかと、改めて発言させていただければと思います。すみません。ほとんど感想にはなったのですが、もう既に専門家の先生方、皆様からやりとりなされていまして、同じこと繰り返すのは止めにしまして、私からはこのような発言とさせていただきます。

以上になります。

○青野企画官 ありがとうございます。

全体を通じまして、何か御質問、御意見等ございますでしょうか。

笠原先生、お願いいたします。

○笠原委員 それでは、よろしければ、後半のテーマについての質問をさせていただいてよろしいでしょうか。

○青野企画官 はい、お願いします。

○笠原委員 堀田さんが説明いただきました格納容器全体のリークに関する部分です。資料では、格納容器の上部の温度分布がついている、18ページですかね。今回、温度評価を中心に御説明させていただいたと思いました。温度評価してもこのパッキン、このガスケット部分の温度は保たれたということが中心だと思います。

一方、少し構造面から見ますと、18ページのように格納容器内に大きな温度分布がつくと、これによる熱変形というのはギャップの開口に影響を及ぼさないのかなと、ふと思ったのですが。そういう評価というのはなされているのでしょうか。

○堀田技術参与 堀田です。どうも御質問ありがとうございました。

確かに、18ページ目の右の温度分布は非常に非対称です。これは計算体系上、压力容器の断熱のミラー部分を考慮はしているのですが、こういったモデルの関係で非対称になるということもありますけども、現実こういった流出が出れば、当然的に非対称は起こるだろうというふうに思われます。

御指摘のこういった非対称が、例えばフランジのギャップの開き具合とか、そういうところに影響を及ぼさないのかということですが、19ページ目にABAQUSのモデルがありますけども、これは軸対象ですので。なぜ軸対象でいいかということは、非常に多数のボルトで締められていまして、トルクもかかっていますので、基本的にはそれほど周方向に拘束条件の相違はないだろうということを仮定しております。フランジのシールの実験は通常、非常に小型の装置で行いますけども、それが妥当だという根拠もやはり、こういった考え方にあるというふうに認識しております。

ただ、さりながら、この軸対象の解析は、左側が開口、格納容器側が開口して2mmという数字、先ほどお示ししました。右側は始点なので閉じています。ただ、右側のFLUENTのギャップの気流の解析ですね。ここでは今、どういう原因かというのは特定しませんけども、一つには格納容器の上部管体のような大型の構造物も、熱応力というのは対象であるはずがないので、そういったところで、こういったトルクで周方向締めてはいるけども、



非一様性があると。もう一つは、ボルトが弾性範囲に収まっていれば、圧力が緩和されたときにはまた締まるだろうけども、仮に塑性域に行ってしまった場合、こういったリーク経路かというのは特定しませんけども、仮にリークがあって内外圧差が緩和されて元に戻ったと。そういうときには、当然周方向の非対称というのは想定せざるを得ないだろうということで、こちらのギャップを流れる気流側の解析は、右側、要するに外側は0.7mm程度のギャップを開けて、そこを流れるようにしております。ですので、ABAQUSのほうは開口を求めるために、そういった始点はゼロ、開口ゼロという仮定でやった。ただ、FLUENTのほうは、そこに気流が流れるという想定でやっていますので、0.7mm程度開けていますので、それがいろいろな場合を想定して崩落しているというのは、現状ではそういった知見は持ち合わせておりませんが、そういった仮定で区別しております。

以上です。

○笠原委員 ありがとうございます。

ざっと見て、すぐここから破損するというふうには思えないので、今回の初期の目的は達成していると、まず思っています。その上での、先ほど言います、これからリスク評価、特にPRAでレベル2PSA、3ということをするのに詳細な、できれば実挙動に近づきたいという観点からの細かな質問です。

まず、軸対称であっても、19ページの図でフランジの上の部分は、今これ、400℃ということで圧力による開放を掲載したのかなと思ったのですが、圧力以外にも上部のほうの温度が上がると、熱膨張差によってやはり、こういう変形モードになりそうかなと。軸対称であっても熱変化を入れたときにどう開いていくのかが少し、影響はあるのか否かを確認したほうがいいのかとも思いました。

それから、もう一つ、今回堀田さんが後半のほうでも、今でも御説明されましたが、流体のほうでは、非常に詳細にギャップが開いたときにどういうふうに気流が流れるかということの説明されて、さらに、その温度影響も評価されているんですね。そうすると、今度は局所的に温度が上がったときに、やはり局所的に熱変形が起こるので、熱変形が起こったことによって、さらに不安定に気流が増えていく方向なのか。あるいは、何か逆のフィードバックが生じるのか。その辺も、安定現象かどうかというのも今後の一つの課題かなと思いました。

初めて聞いた話で、ちょっと勝手な想像だけで言っているもので、そんなことは気にする必要ないということならば、それはそれで安心なのですが、いかがでしょうか。そう

いう懸念というのは、今後の評価する課題として、候補にはなりませんでしょうか。

○森谷技術研究調査官 地震・津波研究部門の森谷です。

今お話ありました、局所的な過温がされた場合というお話なのですけれども、確かに、局所的に過温されますと、部分的に膨張するということはあるかと思えます。ただ、今件の条件の場合ですと、局所的に過温されましても、全体的にも比較的高温になりますので、格納容器全体が膨張するという形になって、温度のみで開口するということはあまりないかなというような検討結果でした。ですので、温度であるとする、材料が若干軟化するとか。それによって、圧力で多少開きやすくなるとか、そういったような形でして、温度についての影響というのは少ないかなと考えております。

○笠原委員 ありがとうございます。

それはちょっと、私の報告書の読み方が粗かったのかもしれませんが、このFLUENTで得られた温度分布をABAQUSに入れて温度分布を構造につけても、熱変形というのはそんなに漏えいに影響することはなかったと。そういう評価がなされているという、そういう理解でよろしいですね。

○森谷技術研究調査官 地震・津波研究部門の森谷です。

本件に関しましては、FLUENTからABAQUSへの解析、データの流れというのはございませんで、事前にABAQUSにおいて、報告書に載せたものと400℃、2Pdとか、そういったものでございますけれども、実際こちらは、例えば200℃、2Pdとか、300℃、2Pd、100℃、2Pd、そういったような条件。または、100℃で1Pdとか、そういったパラスタを行いまして、大方当たりをつけた上で、それをFLUENT側の検討のほうに渡して実施していただいているというものです。ですので、FLUENTから逆、ABAQUSからのデータをFLUENT側と申しますか、シナリオ評価側には渡していますけれども、FLUENTでやった結果をABAQUSに戻して評価といったことは実施してございません。

以上です。

○笠原委員 すみません。できるだけ、せつかくの成果なので正確に理解したいと思う観点からの質問です。

今回気になったのは、構造材の中の温度分布による熱変形です。均一に温度が200℃、300℃、400℃と上がったときの影響ではありません。そういう意味で、FLUENTから詳細な温度分布を構造材にフィードバックするのは大変なので、そこまではこの段階で求めているわけではなくて。例えば、上部ヘッドですかね、上蓋ですか。そこだけが下部の胴より

も温度が上がったとすると、上蓋の半径方向の熱膨張がありますよね。そうすると、下の胴との間に変形のギャップがあるわけで、そういった変形差というのが今回の漏えい挙動に影響しないかと、そういう観点の質問でございます。

○堀田技術参与 堀田でございます。

笠原先生の御質問の趣旨は理解しております。確かに、今回FLUENTの非対称な温度分布を反映はしておりません。それは周方向にかなりの数のボルトが入っていますので、軸対象のモデルの中で、そういった軸非対称の影響というのは、ある程度無視しても目的は達成されるだろうということですが、詳細な観点からいうと、そういったこともやはり検討していかなければいけないといったことは考えております。

一方で、今回この解析、ギャップを流れる気流の解析をしたというのは、例えば、設計漏えい程度のギャップの開き具合ですと、有機シールを高温にさらして損傷するメカニズムというのはやはり、1,800秒という長い時間でも熱伝導ではなくて、そこに気流が到達するかどうかということが確認できたわけでした。そういった観点から逆にたどると、非対称性のような問題で局所にそういった厳しい状況ができる可能性があるのかと。トルクで非常に締めてはいるけども、そういった状況があるのかといったことというのは、今後考えていかなければいけない点の一つであろうと思います。ただ、今回あらかじめそういった上部の配管、フランジでの損傷というのは非常に発生頻度が低いだろうという前提で、あえてそこに熱をこもらせるような解析をしております。そのほかの伝熱メカニズムでやはり上部に熱がこもるのかというと、例えば、圧力容器と生体遮蔽の間のギャップがございますけども、そこも熱い気流が非常に狭い空間を流れて、バルクヘッドの近傍まで到達して、そこからバルクヘッドに穴が空いていますので、多分、上部区間には入るのだらうと思いますけども、幾つかそういった熱を伴う気流の解析をやって、やはり今後、今回非常に想定は厳しい条件でしたけども、どういったところまではリスクの観点で考慮すべきかというところは、先ほど指摘されましたように、レベル2、PRAの観点からも詰めていかなければいけないというふうに考えています。

○笠原委員 堀田さん、大変ありがとうございます。

全体のPRAから見れば、非常に頻度も低ければあまり影響はない細かいことでそんなに詳細な計算をするのは、資源のもちろん無駄だと思っています。もし今回のような熱変形が全体のPRAに及ぼすような可能性がもしあるのだったら、意識に入れておいたらいかなというぐらいでありまして、ここの部分だけ切り取って、これ以上細かいことを議論す

るのも適正ではないと思いますので、今日の御説明でよく分かりました。

ありがとうございます。

○青野企画官 ありがとうございます。

ほかに何か御質問、御意見等ございますでしょうか。よろしいでしょうか。

本日の御説明は以上となります。全体を通じまして、何かコメント等ございますでしょうか。

よろしければ、システム安全研究部門安全技術管理官の田口から御挨拶をさせていただきます。

○田口安全技術管理官 システム安全研究部門の田口でございます。本日はどうもありがとうございました。

本日は、1件、事後評価をいただいたわけでございますけれども、私どもでは、これとは別に電気製品も含めました材料の研究も実施しております。いただきましたコメントを事業の遂行に活用していきたいと考えてございまして、その事業につきましても、今後評価を皆様にいただくこととなりますので、引き続き今後ともよろしく願いいたします。

本日はどうもありがとうございました。

○青野企画官 最後に、事務局からの連絡事項となります。

お配りさせていただいてございます資料4の評価シート及び御意見シートにつきましては、お忙しいところ誠に申し訳ございませんけれども、4月27日までに記載の上、事務局に御送付いただければと存じます。いただきました御意見は、事務局で評価取りまとめ案を作成いたしまして、シート受領後、改めて御連絡をさせていただきます。

それでは、これで第5回材料技術評価検討会を終了いたします。本日は、多くの貴重な御意見、コメント等いただきましてありがとうございました。