

原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法等の技術評価に関する

検討チーム

第1回会合

1. 日時

令和元年7月29日(月) 10:00~12:09

2. 場所

原子力規制委員会 13階会議室B・C

3. 出席者

原子力規制委員会

山中 伸介 原子力規制委員会委員

原子力規制庁

大村 哲臣 技術基盤グループ長

遠山 眞 技術基盤グループ 技術基盤課長

佐々木 晴子 技術基盤グループ 技術基盤課 企画調整官

北條 智博 技術基盤グループ システム安全研究部門 技術研究調査官

塚部 暢之 原子力規制部 実用炉審査部門 管理官補佐

藤澤 博美 技術参与

船田 立夫 技術参与

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 安全研究センター

鬼沢 邦雄 安全研究センター付

高見澤 悠 材料・構造安全研究ディビジョン 材料・水科学研究グループ研究員

外部専門家

沖田 泰良 東京大学大学院 工学系研究科 人工物工学研究センター 准教授

笠田 竜太 東北大学 金属材料研究所 教授

一般社団法人日本電気協会

山田 浩二 構造分科会 幹事

平野 隆 破壊靱性検討会 主査

廣田 貴俊	破壊靱性検討会	副主査
山本 真人	破壊靱性検討会	委員
高田 泰和	破壊靱性検討会	委員
大厩 徹	破壊靱性検討会	委員
神長 貴幸	会破壊靱性検討会	委員

4. 議題

- (1) 日本電気協会 原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法等の技術評価について
- (2) その他

5. 配布資料

検討チーム構成員名簿

- 資料 1-1 破壊靱性に係る規制要求
- 資料 1-2-1 日本電気協会電気技術規程「フェライト鋼の破壊靱性参照温度 T_0 決定のための試験方法：JEAC 4216-2015」「原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法：JEAC 4216-2016」概要
- 資料 1-2-2 フェライト鋼の破壊靱性参照温度 T_0 決定のための試験方法
JEAC 4216-2015の概要
- 資料 1-2-3 原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法
JEAC 4216-2016の概要
- 資料 1-2-4 PTS評価手法
- 資料 1-3 原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法等の技術評価に関する検討チームにおいて議論する内容について（案）
- 参考資料 1-1 原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法の2007年版から2016年版への変更点等

6. 議事録

○山中委員 定刻になりましたので、ただいまから原子力圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法等の技術評価に関する検討チームの第1回会合を開催します。

司会進行を務めさせていただきます、原子炉規制委員会の山中でございます。よろしくお願いいたします。

本検討チームは、原子炉規制委員会及び原子力規制庁の担当者のほかに、3名の外部専門家及び2名の技術支援機関職員に御参加いただいております。

本日は第1回の会合ですので、検討チームメンバーのお名前を紹介させていただきます。まず、外部専門家より、東京大学大学院工学研究科人工物工学研究センター、沖田泰良先生。

東北大学金属材料研究所、笠田竜太先生。

どうぞよろしくお願いいたします。

また、本日は御欠席でございますけれども、大阪大学大学院工学研究科、大畑充先生にも本検討チームのメンバーに御参画いただいております。

続いて、原子力規制庁より、大村基盤グループ長、遠山技術基盤課長、佐々木企画調整官、北條調整官、塚部管理官補佐、藤澤技術参与、船田技術参与が参加いたします。

続いて、技術支援機関である国立研究開発法人日本原子力研究開発機構安全研究センターより、鬼沢邦雄さん、高見澤悠さんが御参画いただいております。

以上が検討チームのメンバーになります。皆様、よろしくお願いいたします。

また、この検討チームでは、日本電気協会が策定した規格の技術評価を行うということで、説明者として、日本電気協会の方々に御出席をいただいております。

お手数でございますけれども、自己紹介のほうをよろしくお願いいたします。

○山田幹事（日本電気協会） 日本電気協会原子力規格委員会構造分科会幹事、山田でございます。

○平野主査（日本電気協会） 破壊靱性検討会の平野といたします。よろしくお願いいたします。

○廣田副主査（日本電気協会） 破壊靱性検討会の廣田です。よろしくお願いいたします。

○山本委員（日本電気協会） 同じく破壊靱性検討会、山本でございます。よろしくお願いいたします。

○高田委員（日本電気協会） 同じく破壊靱性検討会の委員の高田でございます。よろしくお願いいたします。

○大厩委員（日本電気協会） 同じく破壊靱性検討会の大厩と申します。よろしくお願いいたします。

○神長委員（日本電気協会） 同じく破壊靱性検討会委員の神長と申します。よろしくお

願います。

○山中委員 ありがとうございます。

それでは、事務局から配付資料の説明をお願いいたします。

○佐々木企画調整官 原子力規制庁の佐々木でございます。

配布資料ですけれども、議事次第に記載されておりますとおり、検討チームの構成員名簿と資料1-1～1-3までと参考資料1-1になっております。過不足がございましたら、お知らせください。

また、机上には電気協会の規格を、1人1冊というわけではございませんけれども、用意しておりますので、必要なときにはシェアして御使用いただければと存じます。

以上です。

○山中委員 それでは、議事に入りたいと思いますが、議題に入る前に、何か御質問等ございますでしょうか。よろしゅうございますでしょうか。

それでは、初めに資料1-1に基づいて、破壊靱性に係る規制要求について、佐々木企画調整官より説明をお願いいたします。

○佐々木企画調整官 原子力規制庁、佐々木です。

それでは、資料1-1に基づきまして、破壊靱性に係る規制要求について、簡単に御説明したいと思います。

めくっていただきまして、3ページでございますけれども、まず、破壊靱性に係る規制要求といたしましては、「核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律」、炉規法と呼びますけれども、この法律におきまして、原子力規制委員会の規則、「技術基準規則」と呼んでおりますけれども、この技術基準規則に定める基準に適合するように、原子炉施設を維持しなければならないということが要求されてございます。

技術基準規則には、原子炉圧力容器の材料について、設計・建設段階には、適切な破壊靱性があることを日本機械学会の「設計・建設規格」を引用しまして、確認することを求めています。

また、供用期間中には中性子照射脆化が生じるということがございますので、原子炉圧力容器内に監視試験片を設置すること、これを用いた破壊靱性評価を行うことを求めています、この破壊靱性の評価方法として、電気協会の規格を引用してございます。

今回、技術評価を行います原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認方法、これは以下「JEAC4206」と呼びますけれども、これについて少し御説明させていただきます。

めくっていただきまして、4ページですけれども、このJEAC4206は、通常運転時の管理として、まず一つ目に関連温度、これをもとにした温度圧力制限曲線を作成し、耐圧・漏えい試験時、起動停止時、運転時の原子炉冷却材の温度・圧力管理の実施を求めています。

また、破壊靱性評価としては、高温における材料の粘り強さであります上部棚吸収エネルギーを把握することで、原子炉圧力容器の健全性を確認することを求めています。

また、さらに加圧熱衝撃(PTS)評価を行い、事故時における健全性評価を実施するということを求めています。

めくっていただきまして、5ページになりますけれども、関連温度につきましては、三つ目の丸にございますけれども、保安規定という運転の管理を行う事業者にございますけれども、この中で、原子炉の起動・停止に関する運転管理を行うことを求めています、関連温度を評価し、温度・圧力制限を定め、その範囲内で適切な温度・圧力管理を行うことを原子炉設置者に求めています。

まためくっていただきまして、6ページになりますけれども、上部棚吸収エネルギーにつきましては、二つ目の丸にございますけれども、評価の実施を原子炉設置者に求めています、一定の基準以下になる場合には、規格に基づいて詳細な解析評価を行い、十分な強度を有することの確認を求めています。

めくっていただきまして、7ページですけれども、PTS評価に関しましては、加圧された運転状態において事故の際に、非常用炉心冷却系の作動に伴う冷却水の注入により原子炉圧力容器が急激に冷却され、その温度差が内外で生じますので、これにより高い引張応力が容器内面に発生する事象のことを申ししておりまして、技術基準の解釈において、原子炉圧力容器内面にまず亀裂を想定しまして、この原子炉容器を壊そうとする力よりも原子炉圧力容器が耐え得る力のほうが大きいことを確認するというを原子炉設置者に求めています。

なお、新しく今回、技術評価を行いますフェライト鋼の破壊靱性参照温度 T_0 決定のための試験方法につきましては、新しい規格となっております、現在の技術基準の解釈には、まだ引用されてございません。

以上です。

○山中委員 それでは、ただいま説明のありました資料1-1について、御質問、御意見等ございましたらお願いをいたします。いかがでございましょうか。よろしゅうございます

でしょうか。

それでは、続きまして、資料1-2に基づいて、日本電気協会より、今回の議論の対象となる規格の概要について説明をお願いいたします。

○山田幹事（日本電気協会） 構造分科会幹事、山田でございます。

的確な技術評価対応に努めてまいります。

それでは、早速、50分ほどお時間をいただきまして、今回、技術評価をしていただきます規格の内容について説明させていただきます。

○平野主査（日本電気協会） 破壊靱性検討会の平野です。

最初、資料1-2-1で全体を説明いたします。

ページめくっていただいて、今日はちょっと説明の都合上、フェライト鋼の破壊靱性参照温度 T_0 決定のための試験方法：JEAC4216と、その後に原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法ということで、JEAC4206の概要、主に変更点で、3番目に、今回大きな変更をしましたPTS評価手法のところを3番目に説明したいと思います。

3ページ目は、ちょっと参考なんですけども、今、規制庁さんから話があった資料1-1にあるものの全体をまとめています。ちょっと規格がばらばらになっているので、わかりにくいので、これにまとめております。今回対象にしている4206というのは黄色いところにあるもので、先ほど御説明のあった圧力・温度制限曲線の設定の評価ですとか、PTS評価、あと上部棚の評価を記載しているものでございます。新たに4216というものが出ていますが、それは左側の青いところの中にある、試験があるんですけども、その中の破壊靱性試験というのがありまして、それを用いて参照温度 T_0 というものを求めようというのが4216の規格でして、それを用いて4206側の圧力・温度制限ですとか、PTSのほうに活用できるようにということで、新たに設定したものでございます。

ちょっと話のあった脆化予測というのは4201でして、真ん中辺にある脆化予測というのを考慮して、4206の評価に考慮しているというようなことになっていまして、今回は4206と4216の技術評価ということで、ここの説明をいたします。

それでは、資料1-2-2ということで、フェライト鋼の破壊靱性参照温度 T_0 決定のための試験方法JEAC 4216-2015の概要という、ちょっと分厚い資料ですが、よろしくお願ひします。

ページ、めくっていただいて、2ページ目ですけども、全体のイメージ、結構、御存じかもしれませんが、4216というのが、米国で言うASTM E1921に相当するもので、破壊

靱性の試験データを用いて参照温度を決めようという規格になっておりまして、左側が4216にない場合ということで、ここに書いてあるとおり、 RT_{NDT} という先ほど説明があった指標を用いて評価していきまして、それは落重試験という方法とシャルピー衝撃試験という方法で求められた指標を用いて評価しております。これはどちらかということ、いろんな寸法、形状の大型の破壊靱性データから下限を評価しているというものでして、これはこれでいいんですけども、そこから、近年、もう20年ぐらい前になりますけども、破壊靱性評価をするのに、指標として破壊靱性試験データを用いたほうがいいだろうということで、マスターカーブという手法を用いた破壊靱性評価というのが提案されて、それを取り込んで、破壊靱性試験結果から T_0 という参照温度を求めようというのを規格したのが4216でございます。これをやることで、統計的に破壊靱性分布を取り扱うということで、比較的少ない試験片で評価ができるという利点がございます。

その後、2015年に改定してはいますが、このマスターカーブを使うということで、試験片の寸法効果が補正できるものですから、超小型の試験片を用いても評価ができるということで、このほど開発されたミニチュアC(T)というものの試験片を取り込んで、4216の中に入れたということになります。

今日の目次はこうで、まず全体を話してから、2015年版でミニチュアC(T)を入れたという部分の説明をしたいと思います。

ページをめくっていただいて、5ページ目で、これはすごく概要で、規格名は、あくまでも参照温度 T_0 を決定するというものであります。なので、破壊靱性の試験方法と参照温度 T_0 を決定するというのが4216に規定しているということです。これを用いるためにマスターカーブ法を使っていますけども、マスターカーブ法というのは、ここに書いてあるとおりで、遷移温度領域での破壊靱性の中央値と温度の関係が一応一定の形状をしているという前提と、寸法効果の補正式があつて、参照温度 T_0 というものを指標として破壊靱性を規定しているということで、今、国内の圧力容器鋼に対していろいろ試験が行われて、適用性ができるということで、今回、規定にしております。マスターカーブというのは、1T試験片という25mmぐらいの厚さの試験片ですけども、それに対するカーブとして、ここにあるような式で規定されてはいて、これを用いて評価をするということになります。

JEAC4216というのは、ASTMでいうとE1921というのと内容はかなりダブるんですけども、それをダイレクトに用いてもいいんですけども、日本で使うということで、4216というものを新たにつくって、日本で使いやすくしたということです。これを原子力側に持ってき

たというのは、従来の落重試験及びシャルピー衝撃試験による関連温度の決定の代替というか、それよりもっといい評価ができるということもあるので、そういう可能性もあるということで、より精緻な評価ができるのではないかとということで、初期値を求めるときを主にメインにして、このフェライト系の破壊靱性曲線を用いた T_0 というものを求める方法を規定しております。1921とは違うところが若干あるんですけども、非常に、1921、非常に複雑なので、日本で規定されているような形で、マンダトリーなところと、解説的なところをうまく分けたということと、国内の規格に順応できる、適用できるようにしたということです。2015年にはミニチュア試験片の使用に対応した改定も行っております。

では、8ページ目に行ってください、これは全くイメージですけども、試験片の大きさで、先ほど1インチ厚さという、25.4mmですけど、その破壊靱性試験片と、通常使われているシャルピー試験片と2015年に追加したミニチュアC(T)試験片の写真を並べていますけども、これぐらいの大きさの差があるということで、非常に小さな試験片でも、この評価を用いることで評価できるということで、一応、小型の試験片まで使えて、1Tに板厚換算補正して評価を行うということで考えております。

では、マスターカーブの原理というか、もともとの考え方ですけども、9ページ目のところであって、モデルとしては、再弱リンクモデルというものも使っております、強度がいろいろつながっているというもので、最も弱いところが全体の強度を支配するというところで、材料なんかでも若干不均質があるので、強度が異なるばらつきがあるということで、その一番弱いところが壊れるということになっておりまして、長い鎖、板厚が厚いということですけども、そのほうが、弱いところが入る可能性が高いということで、それを考慮して、寸法依存性を考慮できるということにしているモデルです。このモデルは、ワイブル分布に従うということで、ここにあるような式で、一般のワイブル分布ですけども、それではばらつきを評価しているというのがマスターカーブの考え方です。

10ページ目に行きますと、これは今まで使っていた K_{Ic} カーブですが、この辺については、大きな試験片とかを用いて下限値を推定しているということで、材料の違いというのを RT_{NDT} という手法を用いております。これは先ほども説明したように、落重試験とシャルピー衝撃試験から求められるインデックスですけども、それを横軸にして、 $T-RT_{NDT}$ というものを横軸にして、縦軸は破壊靱性ということでプロットして、その下限のカーブを K_{Ic} カーブとして設定して評価に用いているということになります。この場合もそうですけども、今回の場合もそうですけども、照射脆化の指標は、この指標となる温度のシフト、

これで言うと RT_{NDT} のシフト量ということで、 ΔRT_{NDT} をずらすことで評価をするというのが今までの方法でございます。

11ページに行ってくださいまして、マスターカーブの特徴ということで、今、压力容器鋼でフェライト鋼のへき開破壊の靱性値の分布というのを、三つのパラメータのうち二つの固定した特性のワイブル分布によって記述できるということとしておりまして、これは次のページに出てきますけども、今のところ、最小で6~8個の試験を一つの温度で行って、その統計分布特性を評価することで、破壊靱性の中央値とかを求めて、統計的な評価を行うということになっております。

12ページへ行っていただきまして、今、特性のワイブル分布ということになってはいますが、それも、4乗というのがあると思うんですけど、形状パラメータを4と固定したところでワイブル分布を使っているということになります。この分布を使うと最弱リンクモデルが成立するというので、フェライト系材料に対しては成り立つということで、今回、フェライト系材料のマスターカーブを用いた T_0 というのを規定しております。形状パラメータが4ということで、試験片寸法は板厚の1/4乗によって補正できるということで、これで大きな試験片・小さな試験片も板厚の補正をしているというふうな方法を用いております。

13ページ目で、温度依存性、先ほども1回出てきましたけども、一つの共通の曲線、ここに描いてある曲線で規定されるということです。このマスターカーブは1インチ厚さの試験片相当に換算した破壊靱性のマスターカーブ上ということで、その中で $100\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ になるときの温度($^{\circ}\text{C}$)、それを参照温度(T_0)ということで、参照温度(T_0)という定義としては、破壊靱性が $100\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ になるときの温度ということで定義してございます。

14ページもイメージですけども、これも20年ぐらい前にマスターカーブ法が出始めたところに、説明に使われていたものですけども、一番左が破壊靱性の試験結果をとにかくプロットすると、一番左のようなグラフになって、今、真ん中は今 RT_{NDT} を使っているんですけど、それでインデックスにして評価すると、真ん中のようなイメージになって、マスターカーブということで、 T_0 を用いることで評価すると、右側の図のようになるということで、非常にばらつきが小さくなっていくということで、破壊靱性のばらつきというのが、考え方によっては、理論的にというか、ばらつきとして与えられているということで、あと板厚補正もしておりますので、そういう意味では、限られたものとか、小さい試験片でも評価が可能になるということで、とにかくばらつきが小さくなるということで、やっぱ

りこのような手法を使うべきではないかということで考えて、新たに規定しております。

15ページが、じゃあ、 T_0 ってどういうふうに決定するんだということで、簡単な手順を書いております。まず試験を行うんですけど、この場合には、単一試験法の模式図ですけども、手順1で、同じ温度で複数の試験を行って、1Tの試験片の値に換算して、当該温度における中央値を求めるということになります。中央値が求まると、マスターカーブが唯一決まっているので、それと合わせるようにマスターカーブの位置を決めてあげると、カーブの位置が決まるので、その後に100MPa \sqrt{m} と交差するところの温度を求めて、それを参照温度として求めるという手順で T_0 を求めていきます。

16ページが、じゃあ、どういうデータを使うんですかということになりますけども、これは破壊靱性データでも有効データ・無効データ・棄却されるデータという三つに分類して評価を行うことにしております。有効データというのは、そのまま評価に用いるもので、無効データというのは、二つの基準がありまして、へき開破壊の発生前に許容される K_{Jc} の最大値、今、 $K_{Jc(limit)}$ と言っていますけども、それを上回るデータというのが一つで、もう一つは、延性亀裂進展をして破壊したというデータです。これは、ある法則に基づいて「検閲データ」として置きかえて、 T 評価に用いるということです。下に図がありますが、 $K_{Jc(limit)}$ を超えたものは $K_{Jc(limit)}$ に置きかえると。延性亀裂データの大きいものは、有効データで一番最大値のものに置きかえるということをして評価に用います。

3番目の棄却されるデータについては、試験片が寸法がだめですとか、予亀裂が均一でないですとか、そういうような試験条件の規定を逸脱しているものは棄却ということで、データを3種に分けております。評価に用いるのは有効データと無効データで、無効データはデータを置きかえて数として勘定するということになります。

17ページ以降が規格の形で、規格は18ページに書かれている立てつけになっていまして、そこで、今御説明したような手順3が、このようなことで決まっております。説明は単一試験温度法によるものですが、規格のほうでは、複数試験温度法による方法も規定がされていまして、試験温度が何種類かあっても、それによって T_0 を求めるという方法も規定しているということです。最後に、MCT-5300ということで、 T_0 としての有効性を求めるということで、ここで有効性が確認されたら、 T_0 として認められるということになります。

規格の内容ですけど、19ページですけども、模式的に書いていますけど、まず、試験を行いますので、試験片を準備して疲労亀裂を導入するというところがMCT-3000のところの規定されています。その後、破壊靱性試験を実施するというので、試験温度ですとか、

負荷速度という、いろいろな条件がありますので、それはMCT-2000とMCT-4000番台に規定されております。試験をやると、右図のような荷重線変位と荷重のデータが出てきます。ここのデータを用いて K_{Jc} を算出して、個々の K_{Jc} のデータの有効性を判定するということが4000番台ということで、4000番までで試験を行うということになります。

その後、下の段に来ていただいて、それをプロットするんですけど、プロットする前に、1インチ厚さ相当に換算をするということを行います。そのときに、そのデータの無効データ、先ほど説明した無効データは「検閲データ」に置きかえるという操作を行って、その有効データ及び置換されたデータを用いて、ワイブル分布の尺度母数 K_0 というのをまず算出して、それから K_{Jc} の中央値を求めるという操作を行います。その後、マスターカーブが K_{Jc} の中央値を通るように、 T_{0Q} ということで、参照温度の暫定値の算出を行います。その後、暫定の T_0 が一定の条件を満たす場合には、参照温度 T_0 として決定するということになるということで、そういう手順を規定している規格になります。

20ページが附属書の目次で、附属書Aは治具の関係で、附属書Bはシャルピー衝撃試験がデータがある場合にどういうふうに試験温度を設定するかということと、附属書Cは、負荷速度が重要ですので、その設定例で、附属書D～Fについては、今の算出例がどういう数値になるかというのを具体的な数値で示しているということになります。

21ページが解説のほうで、結構新しい技術なので、これだけ解説の項目を設けていまして、特に直接説明しませんけども、詳細なところまで一応解説に記載しているということになります。

22ページが、米国にあるASTM E1921から4216をつくる時に変更したところということで、全般のところで言うと、本文と解説を明確に切り離して、引用はJISの引用をメインにしております。あと、除荷コンプライアンスというのがE1921はあるんですけど、今回は原子炉圧力容器ということで、上部棚のほうは評価しないということで、削除しております。評価に関するAnnexというのは削除したというか、どういう評価をするかというのは、4206側で規制するということになりますので、そこは削除したということになります。あと、材料のほうで不明確なところについては削除しているのと、疲労亀裂の導入条件の K_{MAX} がE1921では $15\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ となっているのを、もともとの破壊靱性規定にあるE399とE1820の規定のとおりで、疲労予亀裂の最終段階の K_{MAX} と、試験で得られた破壊靱性値を当該温度の強度で補正した値に対して0.6倍以下ということで規定していきまして、疲労亀裂を入れたときのK値が破壊靱性の値に影響しないほど小さければいいということで変更をして

いるというのが変更点です。

23ページ以降が、ミニチュアC(T)を用いた場合なんですけども、24ページのほうにありますけども、もともとは破壊靱性試験を用いて T_0 を使うという大目的があるので、それからさらに小さい試験片が実用的だろうということがわかってきたので、それを取り入れたということです。ここにある文献等で、小さい試験片でも評価できるということがわかってきたので、それを取り入れたということになります。

25ページが、小型試験片を用いた破壊靱性評価ということで、イメージ、4Tから今回のミニチュアC(T)まで書いて、非常に小さな試験片ですけども、実際に压力容器鋼を用いた試験データで T_0 を求めてみると、右上の図ですけども、4T、2T、1Tということと、0.4Tということで、真ん中のほうにミニチュアC(T)というのがありますけど、赤いものですけど、それ、ほとんどほかの4T~0.4Tまでの試験片と T_0 の値がほとんど変わらないということで、これは十分に適用可能だろうということで、今回、取り入れることにしております。

次のページ、26ページですけども、じゃあ、この試験、非常に小さいので、ちゃんとできるのかという不安もあったので、電中研さんが主体になって、ミニチュアC(T)試験片に対するラウンドロビンを実施しております。参加機関は、ここに書いてあるとおりで、国内と、あと米国、欧州に試験片を渡して、同じような試験をやっていただいたということでもあります。

左上が全部のデータをプロットしているもので、黒の丸が1T-C(T)のもんですけども、白抜きのもがvalidのデータで、ダイヤモンドのがinvalidデータで、invalidデータは、ある傾向から外れますが、この傾きというのが、先ほど言った4というパラメータで、実際には3.8、3.7ということで、ほぼ4ということで、1Tと同等な結果が得られて、なおかつ4という指数は維持しているということがわかっております。

各試験機関の結果ですけども、いろんな試験機関でやったデータを並べていますけども、試験機関によって、ほぼ同じような値が得られているということで、一部、試験片の不足のための無効ですとか、荷重制御のための無効というのがありますけども、それ以外はvalidな T_0 が求められて、ほぼ、ある範囲におさまっているということで、多くの機関で試験が可能であったということを示しています。

27ページですけども、ミニチュア試験片に対してどういう規定を行ったかということで、最初はミニチュア試験、普通、破壊靱性試験片というのは比例試験片なんですけども、ミニチュア試験片はかなり小さいので、いろんなところで差異があるので、ミニチュア試験

片の試験片をダイレクトに図として規定しました。小さくなることで、いろんなところで変更があるので、予亀裂条件ですとか、いろんなところを見直しております。

めくっていただいて、28ページ目のところで、これが、左上にあるのがミニチュア試験片のもので、違いは、比例試験片なので、主要な寸法は同じなんですけども、クリップゲージの取り付け形状が、なかなか大きな試験片と同様にできないので、その形状が異なっております。

29ページなんですけども、試験片の寸法も、比例試験片にすると、寸法公差も全部比例にしてしまって、かなり厳しくなるので、評価を行った結果、破壊靱性値にそれほど大きな影響を与えないだろうということで、重立ったところを機械公差の寸法として、寸法公差を0.1mmというのを採用しております。

30ページですけども、ここも比例試験片ですとWの何倍ということで、小さい試験だどんどん小さくなってしまって、狭隘ノッチですと、0.08mmのノッチにしなきゃいけなくなってしまうので、現実上、放電加工のワイヤを使用しますので、それだと最大0.25ぐらいだろうということで、0.25に変更してございます。これについては、幅を広げるということで、その後、もちろん疲労ノッチを入れますので、影響が出ないですけども、それを解析によって確認して、実際に寸法を若干広げても問題ないということを確認してございます。

31ページのところは、温度計測のところ、左図が実際の試験をやっているところで、試験片に対して、クレビスという引っ張るところの治具のほうが大きくなってしまいますので、普通は試験片に温度計をつけるんですけども、かなり小さいので、そこではなく、クレビスでもよいということで、規定を変更してございます。

33以降が、どういうものかということで、33ページにあるのは、今説明した4216というのはASTM E1921に相当するもので、試験法というものをういております。ASMEコードが書いていますけど、Code Caseで RT_{70} を介した破壊靱性曲線の設定ということで、それはJEAC4206の今回の改定に反映してございます。直接使用による破壊靱性の曲線ということで、ちょっと趣旨は違うんですけど、Code Case N-830というのがありますけど、今回はPTS評価のほうにそれを使っているということで、これから説明いたします。

34ページのところはN-830ですが、省略をいたします。ここに書いてあるとおりで、4216というのをベースにして、破壊靱性試験片を用いた試験評価等が今後できるだろうということで、評価のほうに持っていきたいというふうに思っております。

1-2-2の資料はこれで終わりにしたいと思います。

次に、1-2-3ということで、JEAC4206の概要ということで、重立った変更点を説明したいと思います。

2ページ目、目次、飛ばしまして、3ページ目も飛ばして、2007年版、エンドースされているので、そこからの変更点ということで説明いたします。

4ページ目ですけれども、左側が2007年版のJEAC4206の目次、大まかな目次でして、右側が2016年版のもので、前のものは「原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法」ということで、全部の破壊靱性ですね、クラス1から炉心支持構造物まで決めていましたが、ここは設計・建設規格と重複するということで、そこは削除して、4206の2016年版は原子炉圧力容器に限定して、なおかつ供用期間中の破壊靱性の確認方法に限定した規格にしております。そこはJSMEのほうにないので、そこは規定しなきゃいけないだろうということと、原子炉圧力容器というキーワードで規格の目次を変更しています。目次の変更に伴って変更したのは、非延性破壊防止のところについては、先ほど言った T_0 を用いて RT_{70} に換算したものの取り込みというのをやっているのと、PTS評価については、最新知見を反映して、大幅に変更しているというのが変更点です。

5ページ目は、雑駁ですけれども、供用状態A、Bと耐圧・漏えい試験と、供用状態C、Dに対してどういう評価をしているかということで、非延性破壊(脆性破壊)のほうは、4100が圧力・温度要求・制限で、4200をPTSということで評価しています。延性破壊のほうは、5000番ということでまとめているというような構成に変更しております。

6ページ目が、今の2016年版の構成ですけれども、1400番に原子炉圧力容器ということで限定したので、それが若干注記になっています。6ページ目の2100で、これは RT_{NDT} という項目ですけれども、そこに対して RT_{NDT} にかえて、 T_0 からの換算値 RT_{70} を使用できるということで、そこに変更を加えております。

7ページ目で、目次は変更していますけれども、3000番台、4000番台は、基本的に内容変更になっておりませんで、7ページ目のところの4200のところのPTS評価について、大幅な変更がなされております。

8ページ目の延性破壊防止、上部棚の評価ですけれど、5100番で、先ほど規制庁さんからの説明でもあった1/4T位置での上部棚エネルギーの要求をここに記載しているということになっております。

主な変更点が RT_{NDT} の部分とPTS評価ということで、9ページ以降、最初の RT_{NDT} の部分の

RF-2100について説明いたします。時間があまりないので、簡単にですけども、 RT_{NDT} の代替として、4216から求めた T_0 を用いて RT_{70} というふうに置きかえて、それを RT_{NDT} のかわりに使っていいということになっております。この式ですけども、 RT_{70} は、 T_0 に C_{MC} という係数に $2\sigma_{T_0}$ ということで、これは破壊靱性を求めるときの T_0 のばらつきの2倍の標準偏差ということで加えておまして、このような式で決めております。今、 C_{MC} を何℃に決めたかということ、今対象にしているのは、 K_{Ic} 曲線と K_{IR} 曲線の2パスということで、 K_{Ic} 曲線については、30℃の C_{MC} を加えてということで決めております。

何でしたかというのを10ページ以降に書いていますけども、主には遷移領域にあるデータと、validの K_{Ic} データというのをを用いて、それが従来の RT_{NDT} を使った評価と同等になるようにということで決めてあります。二つの方法でやっていますけども、一つは平均値マイナス2倍の標準偏差が同等になるところと、あと、比率をとって、ワイブルの比率というか、ワイブル分布2乗にプロットしているんですけど、 K_{Ic} と $K_{I(RTNDT)}$ というのと、 K_{Ic} と $K_{I(RT_{70})}$ という指標を用いて、そのワイブル分布がほぼ同じような破損確率、2.5%のところまで同等になるように C_{MC} を調整した結果、29.9℃ということで、30℃ということで、これらのものによって決めております。

11ページは、解説にあるものなので省略しますが、完全に下限になるものではないので、これでほぼいいなということと、これに加えて、 σ_{T_0} の2倍を加えるので、十分に問題はなからうという評価をしております。

12ページのほうは、 K_{IR} カーブへの適用で、これはちょっとASMEのほうでは35°F(19.4℃)を足しているんですけど、それだと K_{Ic} データが外側に出ってしまうので、下限を包絡するようにということで、ここは難しい操作をしないで、63℃を足して、そのまま使えるようにしております。

この資料は以上です。

次は廣田さんのほうから、3番のPTS評価手法という説明をお願いします。

○廣田副主査（日本電気協会） 電気協会の廣田です。

PTS評価の改定点と、その検討内容について御説明いたします。資料は1-2-4の資料になります。

2ページに目次がございまして、PTS評価の全般的なところと、あと改定点、それから保守性等、その辺、ちょっと御説明、資料になっているんですけども、ちょっと時間の制約がございまして、ある程度割愛して御説明させていただきます。

3ページは、PTS評価手法についてということで、初めにPTS評価のちょっと御説明がありましたので、ここはちょっと省略させていただきたいと思います。

4ページですけれども、2016年版のPTS評価手法の改定の経緯ということで、まとめてございます。その前の2007年度版のPTS評価手法については、国のプロジェクトの成果を踏まえまして、1991年に制定されたものでございます。これは30年ぐらい前に規定したものでございますが、そこから大きな変更はされていないということで、今回、改めて国内外の調査研究動向、あるいは規制動向、それから社会環境の変化、それから運用面という観点で、全般的に見直したということでございます。

5ページが最新知見の例ということで、IAEA-TECDOC-1627というものについて説明したのものになってございます。IAEAの中では、CRPということで、Coordinated Research Project (CRP) というものの9番目のプロジェクト、CRP-9というのがございまして、この中でPTS評価に関する検討がなされているものです。ここでは特に欧州のたくさんの機関が参加いたしまして、ベンチマーク計算を行うとともに、PTS評価書に関するGood Practiceを示すということで、最終的にまとめられたのが、このTECDOC-1627というところでございまして、Good Practiceが示されているということでございます。

次に6ページ目ですけれども、米国のPTS代替規定ということで、最新知見の例ということで説明いたします。米国は、PTS規則というのが1985年に発効されていまして、ここでは関連温度の予測値(RT_{PTS})に対するスクリーニング限度が設定されていたわけですが、過度な保守性がある、合理的な基準にするべきだというようなところがございまして、NRCによるPTS再評価プロジェクトが10年ぐらい行われまして、その上で、2010年にPTSの代替規定というのが発効されました。この代替規定というのは、スクリーニング限度を見直すということなんですけれども、代表プラントに対する確率論的破壊力学評価、これらの検討に基づいて代替規定が発効されたということでございます。この中でも、PTSに関するいろいろな検討がされておりますので、そのような検討も踏まえまして、見直したということでございます。

7ページに行きますと、PTS評価書の主な改定項目ということで示しております。一つは、最大仮想欠陥はクラッド下の半楕円欠陥といたしまして、応力拡大係数にクラッドの影響を考慮したということでございます。二つ目が、応力拡大係数に溶接残留応力を考慮するというのを明記したということです。三つ目が、破壊靱性カーブに5%信頼下限のマスターカーブを採用するということであります。四つ目に、判定基準に高温予荷重効果

(WPS)、また亀裂伝播停止の評価を取り込んだということが主な改定項目でございます。

8ページ～11ページまでが、PTS評価手法の各項目の規定内容ということで書いてございますが、赤字のところは改定した項目ということでございます。ちょっと時間の制約がございますので、このところは、説明は省略させていただきまして、適宜、見ていただければなというふうに思います。

具体的な改定項目は、ちょっと後ほど御説明しますけれども、12ページ以降になります。JEAC4206-2016の策定に際しての検討内容ということで、13ページからが、まず、応力拡大係数の評価手法、応力拡大係数はPTS状態遷移曲線というふうに呼んでおりますけれども、それに関する改定内容と検討内容ということでございます。

13ページにフローがございますけれども、評価対象事象を選定いたしまして、それに対する圧力・温度条件を設定いたしまして、それに従った熱伝導解析・応力解析を実施いたしまして、負荷される応力を算出すると。また、最大仮想欠陥を設定したのに対しまして、応力拡大係数（PTS状態遷移曲線）を設定するというような流れになってございます。

まず、14ページが、最大仮想欠陥の設定というところですが、まず、2007年度版につきましても、原子炉压力容器内表面に深さ10mm、長さ60mmの半楕円表面欠陥を想定するという事になっていたわけですが、実際、原子炉容器の内面には、ステンレスの溶接によりまして、クラッドが施工されております。クラッド溶接が施工されております。このクラッドのクラッドの取り扱いが2007年度版では明確に規定されていないということが一つと、もう一つは、欠陥寸法について、一義的に深さ10mm、長さ60mmというふうに規定しているわけですが、実際には、供用期間中検査であったり、特別点検であったり、個々のプラントで検査を実施いたしますので、そういう検査実績を踏まえた運用が規定されていないという課題があったということで、見直しをしているところでございます。

検討結果のところを見ていただきますと、一つは、クラッドの存在を考慮し、クラッド下の半楕円欠陥を規定するという事です。これは、これまでの供用期間中検査等の非破壊検査の結果、それから米国の調査の結果で、キャンセル炉の非破壊検査の結果とか、それから作用する応力・変動を踏まえますと、クラッドに有害な表面欠陥が存在する可能性は低いということが一つと、従来は評価が困難であったクラッド下の内部欠陥に対しまして、クラッドの影響を考慮したK値の評価が最近では可能になったということが一つあります。

もう一つは、欠陥寸法は、保守的な想定では深さ10mm、長さ60mmというふうに2007年度版の規定を踏襲するんですけども、非破壊検査の検出精度、供用期間中の疲労亀裂進展量を考慮しまして、設定することも可能ですというふうな規定を盛り込んだというところでございます。

15ページですが、負荷される応力の算出ということで、2007年度版ですと、熱伝導解析及び応力解析によりまして、原子炉压力容器の壁内のPTS事象時の温度分布及び圧力から炉壁内の応力分布の時間変化を求めるといったことが記載されていたわけですけども、これだとクラッド及び溶接継手の残留応力の取り扱いの規定がないという課題がございましたので、検討結果のところですけども、PTS事象時の応力に加えまして、クラッドと母材との熱膨張差により生じる応力、それからクラッドの残留応力、並びに溶接金属については溶接継手の残留応力を考慮しなさいという規定を盛り込んだというところなんです。下にグラフがありますけれども、これは実際の継手溶接、原子炉压力容器の継手溶接に対しまして、残留応力をFEMで解析した結果、このような事例もございますので、この辺のところを解説に盛り込みまして、このような残留応力を使って評価をするというようなことになってくるかなというふうに考えてございます。

次の16ページが応力拡大係数の算出というところですけども、2007年度版は、Buchalet & Bamford、あるいはASME Sec. XI Appendix Aの内表面欠陥に対するK値式を使いなさいというふうになっていました。これらの式は、単純な表面亀裂の式でございまして、クラッドの影響を考慮したK値式にはなっていないということです。クラッド下の最大仮想欠陥に対応するK値算出方法の規定が必要だというふうに判断いたしました。検討結果のところですけども、(1)といたしまして、クラッド下の最大仮想欠陥に対するK値式としましては、フランスでいろいろな検討がなされておりました、最終的に、規格でありますRSE-Mの式、RSE-Mという規格に取り込まれた式がございまして、この中ではクラッドの効果を補正するための β 補正というようなK値算出式がございまして、このK値式を使って応力拡大係数を算出するというような規定を取り込みました。それとともに、左下にグラフがございまして、横軸に温度、縦軸にK値をとりますと、今申し上げました(1)、フランスの式を使ったK値の値が青いカーブになってございます。

一方で、最近では亀裂をモデル化いたしまして、FEM解析で直接K値を求めるということも頻繁になされております。それで求めたK値というのが赤の線になっておりました、赤の線に対しまして、青の線というのが、フランスの式というのが、かなり保守的であると。

これはちょっとほかの論文でもいろいろ言われていることでありまして、このようなところがありますので、(2)として、FEMから直接K値を求めてもよいというような規定を取り込んだということでございます。

以上が、PTS状態遷移曲線応力拡大係数のところでございますが、17ページ以降が破壊靱性の評価手法に関する検討内容、改定内容でございます。

17ページ、2007年版につきましては、照射前後の破壊靱性実測値を脆化予測法により評価時期まで温度軸方向に移行させまして、それらの下限包絡するような破壊靱性遷移曲線を設定するというような規定となつてございました。ただ、近年の状況を踏まえまして、これらの遷移曲線、下限包絡というような破壊靱性遷移曲線は見直しが必要だろうというふうに考えたというところでございます。

一つは、国内のPWRの監視試験では、破壊靱性データを取得しておりまして、照射後の破壊靱性データが多数蓄積されたということが一つ。もう一つは、先ほどのJEAC4216の説明にもございましたように、破壊靱性のばらつき等に関する知見が拡充されまして、国内外でマスターカーブ法の適用性が確認されて、海外等で広く用いられるようになったというようなところございまして、マスターカーブを取り入れるべきだというような考えがございます。

いたがしまして、検討結果といたしましては、国内PWR監視試験で取得した照射後の破壊靱性データの傾向分析、それから照射による破壊靱性のシフトとシャルピーのシフトの関係の確認で、その上で、破壊靱性のばらつきや信頼性を定量的に考慮できる手法の取り込みというような検討をいたしました。その上で、規定といたしましては、シャルピーから求まる T_{r30} 、 T_{r30} というのは、シャルピーの吸収エネルギーが30フィート・ポンド、41ジュールに相当する温度、この T_{r30} を指標とした5%信頼下限のマスターカーブを破壊靱性遷移曲線に設定するということが一つと、 T_0 、JEAC4216に基づいて T_0 が取得されている場合には、 T_0 から直接設定した5%信頼下限のマスターカーブによる評価も可能とするというところが、大きく二つ規定として取り込んだというところでございます。

18ページが、 T_0 に基づく破壊靱性カーブでございまして、JEAC4216に準拠した T_0 が取得されている場合には、脆化予測とマージンを考慮した5%信頼下限のマスターカーブを用いてもよいということとしております。式といたしましては、その下のポチにございますように、 $25.2 + 36.6$ というエクスポネーションの式がございます。これが5%の信頼下限のマスターカーブということでございます。これに、この中の $T_0 + \Delta RT_{NDT}$ 計算値(d)とい

うことで、 ΔRT_{NDT} 計算値(d)というのは、右下に模式図がございますけれども、試験片の中性子照射量に対応する関連温度と評価時期での関連温度との差を加えるということがございます。

それから、 M_K というのがマージンの項になってございまして、 M_K 、これは $1.65 \times$ 何々という式がございます。この中では、 σ_{T0} というのが、先ほどの4216の説明でもございましたように、 T_0 決定に当たっての誤差の標準偏差、式がここにございますけれども、このような式で計算するということです。それから、 σ につきましては 9.5°C とありますけれども、脆化予測による誤差もございますので、JEAC4206の2013年追補版も予測誤差の標準偏差が 9.5°C ですので、この標準偏差も加えて、マージンとして加えるというようなことがございます。

次から、19ページ以降が、シャルピーの指標でございます T_{r30} に基づく破壊靱性遷移曲線についての検討内容を示したものでございます。

先に23ページを見ていただきまして、式の形がここで載っております。23ページの左側に、四角で囲んだところで、評価用破壊靱性カーブというような記載がございますけれども、 $K_{Jc} = 25.2 + 36.6 \exp[0.019(T - (T_{r30} + \Delta T_t))]$ とございまして、 T_0 のかわりに $(T_{r30} + \Delta T_t)$ という値を使うということがございます。要は T_{r30} を ΔT_t という補正係数を使って T_0 に換算するというような式でございまして、 ΔT_t は、その下にございますように、鋼種（圧延材、鍛鋼品、溶金）と、こういう三つの鋼種に対しまして、補正係数 ΔT_t を設定したということがございます。

戻っていただきまして、19ページですけれども、まずは今 T_{r30} を指標にしてという話をしたんですけれども、指標は幾つか考えられましたので、何が一番適切だろうということを検討したのが19ページということです。先ほどの式に基づきまして、監視試験の破壊靱性データをフィッティングいたしまして、メジアンカーブ、左側にグラフがございますけれども、 K_{Jc} メジアンというカーブを設定します。そのカーブに対する個々の破壊靱性データとの温度差によってばらつきが出てきますので、そのばらつきを標準偏差として表したのが、19ページの右下の棒グラフということがございます。ここでは、指標といたしまして、 RT_{NDT} 、 T_{r30} 、 T_{r50} 、 T_{rs} 、 T_{r35M} 、五つのパラメータを比較検討したんですけれども、 T_{r30} はそこそこばらつきが小さく、整理できるだろうということと、上の二つ目のポチに書いてありますように、脆化予測の指標は、 T_{r30} でやってございまして、そういうようなことありまして、今後の検討は T_{r30} を指標として検討しようということになりました。

たということです。19ページの左下に文献が四つございますけれども、ちょっと今回、破壊靱性カーブ、ちょっと概要を御説明しますけれども、なかなか詳細まで御説明できないところもございますので、この四つの文献で詳細は御確認いただけるということでございます。

まず、20ページが監視試験データの分析ということで、先ほど言いました破壊靱性の式、マスターカーブの式、 ΔT_t で補正したマスターカーブの式に対しまして、破壊靱性データがどういうふうに分布しているかというのを検討したのが20ページでございます。左上に模式図がございまして、 $K_{Ic(0.05)}$ ということで、5%のマスターカーブに対しまして、マスターカーブ、ワイブル分布で仮定して評価をしますので、右側にありますscatterというところの式、この式を指標としまして、5%のマスターカーブに対する破壊靱性データの位置、上のほうに来ているのかというのを確認したというところでございます。グラフが三つございまして、縦軸が今申し上げたscatterという値でございまして、ちょうど0のところは5%カーブのオンラインのところになります。プラスの値になりますと、破壊靱性カーブよりも上のほうに破壊靱性データが位置するというふうに見ていただければというふうに思います。右上が圧延材、左下が鍛鋼品、右下が溶接金属ということでございまして、横軸に照射量をとっておりますので、照射量に対する依存性が確認できるということでございます。全体をちょっと見ていただきますと、若干、ちょっと右下がりのように見えるんですけども、赤のデータを見ていただきますと、高照射領域、 5×10^{19} 以上のデータが赤のプロットになりまして、鍛鋼品で若干照射量の依存性があるかもしれませんが、ほぼ、照射に対する依存性がないのではないかとこのように判断してございます。

次に21ページですけれども、ここでは5%信頼下限のマスターカーブを使用することの根拠を示してございます。まず、PTS事象より発生頻度の高い供用状態A及びBも含めた設計段階の評価、それから、維持規格などで規定されております検出された欠陥に対する評価、それから圧力・温度制限などでも、ASME K_{Ic} カーブが使用されているということでございます。ASME K_{Ic} カーブと同等のマスターカーブは何%信頼下限かというのが、検討したのが、その下のグラフ、模式図と、右側の表になってございまして、ASME K_{Ic} カーブ開発当時のオリジナルのデータに対する温度裕度というのを破壊靱性カーブに対する温度裕度というのをとりまして、それを正規分布と仮定いたしまして、右側に表で示してありますようなカーブを下回る確率、安全レベルというのを算出してあります。ASME K_{Ic} カーブですと2.5%、それに対しまして、5%マスターカーブですと1.5%ということで、この文

献の結果から、5%マスターカーブというのは、ASME K_{Ic} カーブと同等以上の信頼性を持っているだろうということが判断されます。したがって、この二つ目のポチですけれども、海外では、他の保守性も踏まえた上で、ASME K_{Ic} カーブと同等の保守性を持つ5%信頼下限のマスターカーブが使われようとしているということで、4216の説明でもございましたASME Code Case N-830、それから、最初に御説明しましたIAEA-TECDOC-1627、これの中では、5%信頼下限のマスターカーブを使うということが規定されているということでございます。

次に22ページですけれども、破壊靱性カーブに対する包絡率を評価したものになってございます。高照射領域 5×10^{19} 以上の監視試験破壊靱性データに対しまして、破壊靱性データに対するメジアンカーブを設定するわけですけれども、それに対する包絡率を見たのが、この三つの図になります。圧延材、鍛鋼品、溶接金属、いずれにつきましても、95%以上の包絡率を有しているということが確認できると思えます。

次に23ページですけれども、実際に評価に使う際には、脆化予測を行いまして、 T_{r30} の予測値を使いまして、さらに脆化予測に伴うマージンといたしまして、 3°C というのを考慮することといたしております。この T_{r30} の予測値を使った場合が、23ページのグラフになってございまして、予測値を使って 3°C のマージンを考慮することによりまして、やはり圧延材、鍛鋼品、溶接金属、いずれにつきましても95%以上の包絡率を有しているということが確認できたということでございます。

24ページ以降が健全性評価手法に関することになってございまして、2007年度版につきましては、PTS状態遷移曲線、応力拡大係数と破壊靱性遷移曲線が交差しなければ健全と評価するというところでございましたけれども、検討結果のところですが、一般評価と詳細評価、二つの規定を設けてございまして、一般評価は簡易的にスクリーニングするための保守的な評価ということで規定してございまして、一般評価では、過渡解析を伴わずに保守的に判定可能なスクリーニング基準としまして、大LOCAを対象としました非延性破壊の発生の有無を評価するというところでございます。一方で、(2)の詳細評価におきましては、2007年度版と同じなんですけれども、大LOCA、小LOCA、MSLBを対象といたしまして評価をするのですが、WPS、高温予荷重を考慮した非延性破壊の発生、それから、亀裂伝播停止の評価を取り入れたということでございます。

(3)は是正措置についても、今回、2016年版では明記するようにしたということがございます。

25ページですけれども、高温予荷重効果を取り入れた理由というところでございます。高温予荷重効果といたしましては、K値が単調減少する場合は非延性破壊が生じないとするWPS効果の一般的法則というふうに呼ばれておりまして、これは、国内及び欧米で実験的に成立することが確認されています。

下にグラフがございまして、これは国の発電技検のプロジェクト、1994年に発行された文献から持ってきておりますけれども、破壊靱性のばらつきのバウンドがハッチングした領域になりまして、除荷時とK値が減少する過程はscatter bandの中では破壊しなくて、その後、K値が上昇したところで、バツの印がありますように破壊したというようなところで、WPS効果が確認されているというような事例でございまして。

そういうことで、国内ではJSME維持規格にも高温予荷重効果は取り入れられておりますし、各国の規格でも取り入れられているということですので、今回、JEAC4206に取り込んだということでございます。

もう一つが、26ページが亀裂伝播停止の評価ということで、PTS評価における亀裂は内表面近傍に亀裂を想定しますけれども、板厚内部では中性子は減衰するために外面側の破壊靱性は高いということが一つと、外面側の温度低下は小さいということで熱応力は小さくなります。したがって、仮に非延性破壊が発生したといたしても、亀裂が容器の外面まで伝播する前に途中で停止する可能性があるだろうということで、下にあるのは米国のオークリッジ国立研究所の試験データと解析結果でございまして、亀裂が進展したとしても亀裂が停止するであろうということが示されているということでございます。

これは、同じように国内のJSMEの維持規格でもこの亀裂伝播停止の評価は取り入れられておりますし、各国規格でも取り入れられた事例がございまして、JEAC4206にも取り込んだというところでございます。

27ページがPTS評価手法の評価フローの比較ということですが、左側が2007年度版のフロー、右側が2016年度版のフローになってございまして、青で示したところが一般評価で取り入れた項目、赤字のところは詳細評価で取り込んだ項目というところで、詳細はちょっと説明を割愛させていただきます。

28ページも、一般評価、詳細評価、あまり詳しく説明しなかったんですけれども、この表の中で想定欠陥、想定過渡とか、その辺の項目について比較した形で示しておりますので、ちょっと見ていただければというふうに考えてございます。

最後に、29ページ以降が健全性評価に関する保守性ということで、29ページが応力拡大

係数の評価手法に関する保守性ということで、想定欠陥、それから想定過渡。30ページが破壊靱性の評価手法ということで、一つ目が周方向の照射量分布、一番厳しい照射量をとって評価をしますということであったり、板厚内の破壊靱性にも分布があって、内表面では靱性が高いでしょうというようなところとか、(3)はCT試験片等は拘束が非常に強くて、靱性が低目に出るわけですけれども、実機はもうちょっと高いでしょうというようなところが保守性としてあるということでございます。

31ページが判定基準に関するところで、高温予荷重効果、亀裂伝播停止評価、この辺は一般評価では取り入れられていないというところで書いてございます。それから(3)といたしまして、今、4206では決定論的評価ということで、欠陥とか破壊靱性とか、それぞれを保守的に設定して厳しいところどりをして評価をしているわけですけれども、実際には不確実さがありまして、そういうようなところをリスクという形で定量的に評価すれば合理的な評価になるのであろうというところを書いてございます。

ちょっと説明が長くなりましたけれども、以上でございます。

○山中委員 ありがとうございます。

ただいま説明のありました資料1-2について、御質問、コメント等ございますでしょうか。いかがでしょうか。

○沖田准教授 東京大学の沖田と申します。

1点、まず、資料1-2-2、JEAC4216-2015の概要について一つ教えてください。マスターカーブを取り入れてミニチュア試験で測定するということになっておりますが、やはり、ミニチュア試験についてお伺いしたいことがございまして。どうしても非均質性を、今回、対象外とされておりますが、均質性がどこまで担保されているかというのは一つ、ミニチュア試験では問題になってくるかと思えます。その扱いがどうなっていますでしょうか。

○山本委員（日本電気協会） 山本でございます。

ラウンドロビン試験、それから大きな試験片から小さな試験片までの寸法依存性の確証試験というのは、まさに不均質によってミニチュアC(T)試験片で大きな試験片と違う傾向が出るか、出ないか、そこを確認したということになります。日本の材料につきましては、鍛造それから圧延の材料、代表的なものについてラウンドロビンも含めて確認をして、ミニチュアの試験片でも大丈夫だろうというふうに確認したということになっております。

○沖田准教授 ありがとうございます。

もう一点、お伺いさせていただきたいんですが、解説にもありますが、累積損傷確率の

2%~98%の範囲から外れるデータが存在する場合は、非均質材の可能性もあるということが規格に載っておりますが、これが非均質材として取り扱えるのか、それとも、やっぱり脆化が特に進行したデータとして取り扱うのか、この取り扱いはどのようにされるのでしょうか。

○山本委員（日本電気協会） 2%~98%を超えるものが、すなわち不均質ということではなくて、2%、98%というのは裾野の遠いところでございますので、ここに例えば2%ではなくて5%分のデータ点が入ったとか、そういうことになりますと、分布そのものがマスターカーブの規定している破壊靱性の分布に載らないということで、そのような場合には不均質と扱うということです。ですから、2%を下回ったものが不均質なところとしたとか、そういうことではないということでございます。

これでお答えになっているでしょうか。

○沖田准教授 ありがとうございます。

○山中委員 そのほか、いかがでしょうか。

どうぞ。

○笠田教授 資料1-2-2のほうなんですけれども、25ページに小型試験片を用いた破壊靱性評価で4T-C(T)からsub-Size Precracked Charpyの試験片まで T_0 を求められているんですけれども、今回、議論の中心になっているMini-C(T)は非常に大きなC(T)試験片と同等の T_0 が得られているように見られるんですけれども、一方で、ベンドバータイプというか、シャルピータイプのものは、かなり安全側ではない評価になるように読み取れてしまうんですけれども、一方、規格では普通にベンドバーの試験片も取り入れることになっているということで、この辺、どのいうふうに考えたらよろしいのでしょうか。

○山本委員（日本電気協会） ベンドバーの試験片、シャルピーのプレクラックシャルピーということになりますけれど、これについては、国際的にもバイアスといひまして、試験片形状の影響があるのではないかということは指摘をされております。これは、全てに対してあるわけではなくて、あったり、なかったりということですので、その分は十分注意をしなければいけないということになると思います。

ですから、そういった試験片を用いる場合には、そのバイアスがかかる可能性があるということを使用者側が注意するということになると思います。

一方で、C(T)試験片につきましては、バイアスといひますか、試験片の寸法影響は、こういったようにないと、ほぼないということが国際的にも確認されているところござい

ます。

○笠田教授 それは私も何となく理解しているつもりなんですけれども、一方で、この事業者側が0.4T SE(B)みたいな試験片を使う場合は、関係性、何がどう変わってくるんですかね、この後のPTS評価に向かっていくところのロジックの中で。いまいち、その部分が見つかり切れなかったんですけれども。

○山本委員（日本電気協会） これは4216ではなくて、多分、4206のほうになってくると思うんですけれど、例えば、それを取り込もうとする場合に、安全裕度がどれだけ担保されているかというところで、もちろん担保されるんですけれど、試験片の形状の影響も十分考慮する必要があるということになると思いますけれど。

○笠田教授 具体的な考慮の仕方がちょっと読み取れなかったんですけれども、すみません。

もうちょっとははっきりあれだと、要するにMini-C(T)と同等の値が出ていないものを使っていいことの根拠がよくわからないというのが、 T_0 が全然違う数字になっているじゃないですか。これ、一応バリッドという前提なんですよね、ここの25ページの数字というのは。

○山本委員（日本電気協会） そうですね。

○笠田教授 ただ、かなり0.4T SE(B)のほうが低い参照温度が出ているけれども、一応これも、この規格の中ではあるということになっているんですよね。

○山本委員（日本電気協会） はい。

○笠田教授 そこがちょっとよく、私、わからないんですけど、その論理構造というか。

○平野主査（日本電気協会） 破壊靱性検討会の平野ですけど。

おっしゃるとおりで、もともと4216をつくったときには、E1921の適用範囲でそのまま試験片も規定していますので、もちろんSE(B)試験片もプレクラックシャルピーみたいなものもできるようになっているんですが、規格中も少し議論になったんですけど、それに対しては、特にベンド型の試験片は、時によくないデータが出てくるというのは国際的にも、国内の結果でも出ていて、それをどうしようかとちょっとうやむやになったまま、申し訳ないなんですけれども、Mini-C(T)だけ追加してしまったので、今こういうふうになっているので、今後ちょっと、このベンドを使うというのは当面ちょっと考えていないというのが半分あって、このままになっているので、そのバイアスを定量的に入れられるかとかということに関して、今後ちょっと課題があるとは思っています。

○笠田教授 いろいろちょっと細かいところをお聞きするんですけど、 $K_{Jc(\text{limit})}$ を決めるときに、 σ_y を使うと思うんですけども、こちらの σ_y 、多分、非照射材の値でも安全側になると思うんですけども、これは照射材のデータを使うという、要するに、そのものの条件の、監視試験の引張試験片データを使うのか、その辺りが明記されていないんですけども、これ、どういうお考えになっているんですか。

○山本委員（日本電気協会） 規格上は、その材料のその温度ということになりますので、照射材をやる場合には照射材の降伏点ということになるわけです。

○笠田教授 それは、従来の規格の引張試験片の形状のもの、監視試験のものを使うというふうな認識、その材料というのはそういう意味なんですか。

○山本委員（日本電気協会） はい。

○笠田教授 了解です。

○平野主査（日本電気協会） 試験温度のその材料の降伏点というのは、ダイレクトに普通とれないじゃないですか。

○笠田教授 とれないのはわかります。

○平野主査（日本電気協会） なので、一応、推定してというか、算出して用いるという形。

○笠田教授 それは室温のデータを用いて推定するということですよ、その試験温度の。

○平野主査（日本電気協会） はい。

○笠田教授 ただ、それは照射材を用いた室温のデータを用いると。

○平野主査（日本電気協会） はい。硬化しているはずですので。

○笠田教授 了解です。

○山中委員 そのほか、いかがでしょう。

どうぞ。

○笠田教授 細かいこと、私もこの辺、破壊靱性試験片、昔、苦勞した覚えがあるのでお聞きしたいんですけども。治具の形状とか、今回、きっちり小さい試験片に規定しているのは大変いいことだと思うんですね。やっぱりこの辺、かなり難しい実験だと思うんですけど。これ、ピンの要求というのはないんですか、これは。すみません、細かいことで。

○山本委員（日本電気協会） ピンの要求については、大きな材料と同じ要求です。小型だからといって違うものはありません。

○笠田教授 あと、最後の一つなんですけれども、海外の動向等に従って $100\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の値

で参照曲線をつくるというところだと思わすけれども、一方で、 RT_{70} を求めるときに、 C_{MC} というのが多分出てきていると思わすけれども、これがあるということは、100にこだわる必要があるのかどうかがよくわからなくて、むしろ、その値になるような何MPa \sqrt{m} というのを選ぶというロジックにはならないんですかね。ちょっと私、ちゃんと理解できているかどうかわからないんですけれども。

○山本委員（日本電気協会） カーブは一緒ですので、算術上の問題でどこに置くかということになると思います。マスターカーブ法の T_0 というのは、一般にも広く認知されてきつつあるものだと思いますので、そこから計算するのはリーズナブルなところかなと思います。

○笠田教授 最後、これが本当の最後です。 T_0 の分布を正規分布で表現できるとか、表現できると仮定するということがあったんですけれども、何かワイブル分布をずっと言っている中で、破壊靱性の値そのものがワイブル分布に従うんだけれども、こっち側にすると、 T_0 にすると正規分布に従うというのは、何か理論的なバックグラウンドというのはあるんですか。ちょっと私、不勉強でそこを理解できていないんですけれども。

○山本委員（日本電気協会） T_0 の分布のほうについては、実験的な測定の分布というようなどころが多くて、そうすると一般的な分布ということで正規分布と、御存じのとおり、破壊靱性は最弱リンクですのでワイブル分布ということになります。

○笠田教授 わかりました。

以上です。

○佐々木企画調整官 原子力規制庁の佐々木です。

今の御質問いただいているのに関連して、26ページにグラフが載っているんですけれども、下のグラフは、これはばらつきが小さいという御説明でしたし、大きいのか小さいのかわからないんですけれども、先ほどの沖田先生の御質問ではありませんが、材料の均質性とか、あるいは測定者の技量、測定のばらつきですとか、いろいろなばらつきが入っているんじゃないかと思わすけれども、そういうものは個別に、あるいは全体として評価されているのでしょうか。

○山本委員（日本電気協会） この縦軸方向がどれぐらいまでがリーズナブルで、どれぐらいからがリーズナブルでないかという御質問だと思わすけれども、これは、マスターカーブ法の規格の中に破壊靱性の分布がこれぐらいであって、リーズナブルなばらつきの範囲はStandard Deviationがこれはこれぐらいであるというのを規定しております。

ここでは、その標準偏差に基づいて、このばらつきがリーズナブルであるかどうか、具体的には 1σ にどれぐらい入っているか、最大でも 2σ の中にきちんと入っているかということを確認しております。

○佐々木企画調整官 原子力規制庁、佐々木です。

今日は、この資料で御説明をいただきましたので、今後、技術評価を行うに当たって、その辺もちょっと御説明いただければと思います。

ちょっと違う資料になりますけれども、資料1-2-4の10ページを見ているんですけども、非常に使う側からとして基本的な質問なんですけれども、新しい規格では、 K_{Ic} の式を T_0 を使ったものと T_{r30} を使ったものを採用されていまして、一方で、現在、規格として使われている2007年版は K_{Ic} のASMEの式を使っていると。その現在使っている式を採用しなかった、規格に載せなかった理由は何なのか教えていただけますか。

○廣田副主査（日本電気協会） ASMEの K_{Ic} カーブというよりも、監視試験で取得される破壊靱性データの下限包絡を使うことが一般的によく使われていまして、それについては、ちょっと説明したつもりだったんですけども、そういうちょっと下限包絡というよりも、監視試験で破壊靱性データがたくさん取得されていますし、マスターカーブでばらつき試験というのも評価するという流れになっていますので、マスターカーブを取り入れた評価に、これは17ページに書いておりますけれども、マスターカーブを取り入れたほうが精度の高い評価ができるだろうというふうに考えたということです。

○平野主査（日本電気協会） 補足で。1点あるのは、ASMEの K_{Ic} カーブに相当するものは、供用状態A、Bのほうで使っているので、規格の中には規定しております。

供用状態C、Dにあったもともとの下限カーブというのは、1991年の国プロの成果を反映したPTS専用の下限カーブ、式は覚えていませんが、ASMEの K_{Ic} カーブと言われているものとは違う式でPTSのほうはもともと評価していたということです。

○佐々木企画調整官 原子力規制庁、佐々木です。

ちょっと私の説明が間違っていてすみませんでした。じゃあ2007年の式を採用しなかった、今使っている式の評価は、今後どうすればいいのかがわからないという質問なんですけど、使ってはいけないから消したわけではないということですか。

○廣田副主査（日本電気協会） 現状の下限包絡を使うよりも、マスターカーブを前提にした精度よい評価をしたほうがいいだろうということで、それは、もう2016年度版では使わないというふうにしたということです。より精度の高い評価をすべきだろうということ

で見直したということです。

○佐々木企画調整官 原子力規制庁、佐々木です。

ちょっと、具体的に説明していただくときに説明していただいたほうがいいかもしれないんですけども、新しい式と古い式が併記されていて、どちらも使ってもよいというような展開もあったと思うんですけども、それがされていないのでちょっと疑問に思っていたということです。

○廣田副主査（日本電気協会） わかりましたけれども、先ほど言ったとおりで、やっぱり精度の高い評価にすべきだろうということで、前のやつはもう消しました。残す手もあったかもしれませんが、精度の高いほうを選んだということですね。それだけです。

○佐々木企画調整官 原子力規制庁、佐々木です。

さっきの10ページですけども、 T_0 の式を使うのはそういう理由かもわからないですけど、一方で T_{r30} を使う式もあるわけですけど、これはなぜ T_{r30} の式もあるんですかね。

○廣田副主査（日本電気協会） 廣田ですけども。

まずは、マスターカーブが、やっぱり前提にして評価をすべきだろうという考え方がありまして、10ページの下にありますマスターカーブの式を規定したと。ただ、監視試験の中で破壊靱性データを取得する中で、 T_0 は必ずしも取得できるわけではないので、それに対する代替の方法として、ただ、マスターカーブに従った評価をしたいということでシャルピーの指標を用いたマスターカーブを規定したということです。

○佐々木企画調整官 原子力規制庁、佐々木です。

もう一つなんですけど、同じところに5%信頼下限のマスターカーブを設定と書いてあるんですけども、この5%という数字を採用した理由は何なんでしょうか。

○廣田副主査（日本電気協会） 21ページに、説明したつもりなんですけれども、ASME K_{Ic} カーブがよく使われていまして、PTSよりも頻度の高いような供用状態A、Bとか、検出された結果に対する評価でASME K_{Ic} カーブが使われていまして、21ページの下にありますように、ASME K_{Ic} カーブと同等の信頼性、安全レベルを持つというのがマスターカーブでいうと5%だというような文献がございます。また、二つ目のポチにありますように、ASME Code Case N-830、あるいは、最初に申しあげましたIAEA TECDOC-1627、IAEAでまとめられたレポートの中でも5%信頼下限のマスターカーブを使うということが記載されておりましたので、それに基づいて5%を採用したというところでございます。

○佐々木企画調整官 原子力規制庁、佐々木です。

これは、じゃあ何%にするかという検討をされたんじゃないなくて、ASTMなりASMEなりが5%としているということがいいかどうかを評価されたらと、そういうことですか。

○廣田副主査（日本電気協会） それと、だから、ASME K_{Ic} カーブと5%のマスターカーブが同等だという評価をされている文献がありましたので、それに基づいて5%マスターカーブを使ったということです。ほかの規格とか、IAEAのレポートがそういう評価をしているというところと、ASME K_{Ic} カーブと5%マスターカーブが同等な安全レベルを持つという知見がございましたので、それに基づいて5%マスターカーブを使っているということです。

○佐々木企画調整官 原子力規制庁、佐々木です。

ありがとうございます。またこれも詳しい説明を次回以降にお願いしたいと思います。

○山中委員 そのほか、いかがでしょう。

○沖田准教授 東京大学の沖田でございます。

先ほどのところで、じゃあちょっと追加質問させていただきたいのですが。安全レベルをどれぐらい下回るかということに関しては、ASMEと5%は同等と思われるんですが、どれぐらい下回るかということに関しては、ここだけ情報がないんですが、いかがでしょうか。

○廣田副主査（日本電気協会） どれぐらいというのは、例えばですが、21ページはASME K_{Ic} カーブ開発時のオリジナルデータに対して分析したデータでございます、これだと右側の表でございますように、ASME K_{Ic} カーブだと安全レベル、すなわちカーブを下回る確率が2.5%で、5%マスターカーブを使いますと1.5%、こういうようなことになるんですけど、そういう御質問ではなくてですか、ちょっと。

それか、もしくは、実際のPWRの監視試験データに対する5%マスターカーブの包絡性という意味では、22ページ、23ページ、これで包絡性を確認しております、いずれの材料につきましても95%以上は包絡できているということです。

○沖田准教授 そのカーブからの包絡できていないデータが何%という具合に、そのカーブからどれぐらいの絶対値、離れているかというのを一つの安全レベルでは必要かと思うんですが。これ、もう一つ、下のカーブを下回る確率と、どれぐらい下回ったかというのが必要になります。

○廣田副主査（日本電気協会） まず、もうちょっと説明いたしますと、先ほどのASME K_{Ic} カーブの包絡率というのは、21ページですけれども、左側に模式図を書いてございま

すけれども、ASME K_{Ic} カーブ、あるいは5%信頼下限のマスターカーブに対しまして、各試験データの温度差、温度裕度をとりまします。先ほどちょっと正規分布という話がありましたけれども、この横軸方向、温度軸方向のばらつきというのは、正規分布だろうというふうに仮定いたしまして、その温度裕度の平均、それから標準偏差を求めましたら、カーブを下回る確率というのも出てきます。正規分布と仮定して2.5%、あるいは、1.5%のところになったということなんです。だから、実データが2.5%、1.5%ということではなくて、正規分布と仮定したときに平均と標準偏差からこれぐらいになるだろうというのが、このカーブを下回る確率が出ます。

もう一つ、22ページ、23ページについては、ここで言っている照射後データに対する包絡率、数字で書いてございますけれども、これは、今、おっしゃったように、本当の何点のデータがあるうちのデータが外れた、データが上回っているのが何点というようなデータになっています。

ただ、これと先ほどの21ページの評価と同じような評価をやっておりまして、それはちょっと今回、説明資料から省かせていただいているんですけれども、できれば次回、御説明させていただければというふうに思います。

○笠田教授 私もちょっとこの辺、次回以降かなと思っていたんですけれども、こちらの、だから安全レベルカーブを下回る確率というものの確率というのが、ちょっとやっぱり社会的意味合いというか、そういったものがわかりづらくて、結局、原子力プラント全体での安全確率論的評価みたいなものにおける確率が伝播していく中での意義づけというのが、ちょっと一般的にはわかりづらいかなど。これがそのままひとり歩きしちゃうと、2.何%外れるものがあるんだったら、それはちょっとどうなのという話が出てきちゃうような気がするんです。これはあくまでもここの中での確率の話なんですけれども、今まで温度が何度移行したかとかという、そういう決定論的な話だけのところだったのに、確率が入ってくると、それがどういう全体の原子力プラントの全体の安全性の中での確率論的にどういふ話があるのかというのが説明がないと、何かいろいろ突っ込まれてしまうのかなと私的には思うんですけれども、その辺りどういうフィロソフィーというか、ものがあるのかというのを教えていただきたいんです。

○廣田副主査（日本電気協会） おっしゃるとおりのところはございまして、やはり21ページはあくまでやっぱりASME K_{Ic} カーブと同等だということを示しているだけです。

あと、保守性のところで書きましたけれども、やっぱり決定論でやる上では、厳しいと

ころどりでやらざるを得なくて、ただ、笠田先生がおっしゃるように、やっぱりリスクという観点で見るべきだということもありまして。それとともに、あとは、今回お示ししませんでしたけれども、破壊靱性カーブについては、前回のカーブとの比較、どういうふうに厳しくなったかとか、そういうようなところは出していききたいなというふうに思っていますのと。

あと、確率論的な評価として、米国に対してどうか、今、安全目標があるわけでは、明確になっているわけではないところがありまして、なかなか示しにくいところはあるんですけども、一つの示し方として、米国のクライテリアに対して今回の決定論の評価がどの辺に来るか、そのようなところは次回ぐらいに説明させていただくことができるかなというふうに思います。

○山中委員 そのほか、いかがでしょう。

○船田参与 規制庁、船田です。

先ほどの佐々木の質問に関連するんですけども、マスターカーブの説明のときによくASME K_{Ic} カーブと同等になるように係数を決めましたとか、いろいろおっしゃっているんですけども、もしそういうのが念頭にあれば、今ある破壊靱性曲線が全部変えなくてもいいんじゃないかという気持ちになってくると思うんですよね。わざわざ今あるのに合わせるためにマスターカーブを使うのであれば、修正しますというのであれば、そこまでしなくても、今のままでもいいんじゃないかという気にもなってくるんですが、この辺の説明と。

あと、マスターカーブで今は1インチASMEの試験を使ったりの破壊靱性曲線に直したりしているんですけども、そういうマスターカーブのいろんな、決めるときに使っている1インチとか5%とか、そういうことが、今後というか、原子炉容器の健全性を評価するのにどうしても必要なかどうかというのを、そこら辺の説明をまた後でもいいんですけど、含めて説明していただけたらなと思います。ちょっと変な質問で申し訳ないんですが、そういうように感じました。

○廣田副主査（日本電気協会） 持ち帰り検討して、御説明するようにいたします。

○山中委員 そのほか、いかがですか。

○藤澤参与 技術参与の藤澤です。

3点ばかりちょっと質問します。最初は、資料1-2-2、これの28ページ、29ページにミニチュア試験片の形状についての説明がございますが、このミニチュア試験片のナイフエッ

ジのところ、この寸法については、特に深さですね。幅についての規定があるんですけども、深さについての規定がないんですけど、これはまずどういうふうに考えているのかなということなんです。

なぜこういう質問をしますかという、このピンの穴の位置と、この図でいうときのナイフエッジの部分がかなり接近しておりまして、ここの部分が、逆にその寸法が、ナイフエッジの深さが深いとピン穴に接近して、結局、この試験で荷重を与えたとき、この部分が、要は、ばねのような役目をして、要は、この亀裂に対して、へき開寸法に対してちゃんと出るのかなという影響、要は、寸法に影響、測定に影響を与えるのではないかという懸念がちょっとされますので、そこの深さについて、まず質問したいことです。

それから、特に29ページのほうに、資料の29ページですね。そちらに寸法公差についての規定がございます。これは、加工の利便性を考慮したということが書いていて、赤枠のところを変更したとあるんですけど、例えば、これ、もともとは、シャルピー試験片のものを使ってミニチュア試験にしようということだと思うので、シャルピー試験片の寸法の公差を使ったのかと思って実は見たんですけど、今のJISのシャルピー試験片と寸法許容差が違います。逆に、寸法許容差がJISのほうが厳しいところがあって、特にWという数字、試験片の場合の、Wじゃないな、1.25Wですか、 10 ± 0.1 という寸法のところですね。そこはシャルピー試験片のほうは 10 ± 0.075 ということでJISのほうが厳しいんですね。そうすると、ここでわざわざ緩める理由は何なのかというのがちょっとわからないというところがございます。

もう一つ、そういうふうなことで見ていくと、やっぱり、この0.1、赤枠で囲ったところですね。例えば試験片の幅B寸法、厚さですね。試験片の厚さB寸法ですけど、これ、4mmに対して、今、 ± 0.1 になっていますけど、JISにもサブサイズ試験片というのがございます。その場合には、厚さが、確か7.5mm、2.5というふうに厚さが違うんですけど、当然、寸法許容差は小さくしておりまして、ちょっとそれを見ても、この4mmに対する0.1というのはちょっと緩いんじゃないかなというふうな感じがあつて。

これ、要するに加工のことを考えてやるのであれば、シャルピー試験をやっているのに、なぜこちらで、それよりもさらに緩くするのかということのはちょっとわからないので質問したい。次回、回答でもいいですけど、ということなんです。

それから、もう一つは、33ページにございますけれども、マスターカーブ法の活用に向けた海外の動向ということで、これは単なる質問ですけども、一番下に産業界で米国の

PWR Owners Groupが監視試験材料を対象としたマスターカーブ法による破壊靱性評価研究というのをやっていると書いていますが、これは、監視試験片ですから、多分、同じようにシャルピー試験片を使っていると思うんですけど、試験片の寸法としては、やっぱりミニチュア試験片と同じようなことをやっているのかどうか、それについて説明をお願いします。

それからもう一つは、資料1-2-4というんですけど、その20ページ、そちらに監視試験データの分析というのがありまして、先ほど説明がありまして、赤いプロット、これについて、鍛鋼品は、若干、照射量に依存性があるけれども、それ以外の圧延材と溶接金属はそんなにないよというふうな説明があったんですけど、これ、照射量に対しての話を見ますと、当然、照射前後のやつもありますけど、照射量の大きいところと小さいところですけど、全部含めて見た場合に、やっぱり三つとも右下がりの傾向にあると私には見えるんです。

そうすると、これ、ここの説明文にあるような母材と溶接金属は照射量に対して依存性はないというのは、ちょっと言い過ぎじゃないかなというふうな感じがいたします。それについて回答があればお願いします。

以上です。

○山本委員（日本電気協会） 山本でございます。

まず、最初の1から3について、簡単に。1について、ノッチ底の深さについてはおっしゃるとおりでございまして、少し持ち帰って、どうしたらいいかというのを検討してから、次回以降、御説明したいと思います。

二つ目、寸法公差でございまして、シャルピーに対してというふうにおっしゃっていただんですけど、実際には、これはシャルピーではなくて、破壊靱性の試験片同士での比較で行っております。ですから、シャルピーの公差がこうだから、破壊靱性試験片はこうだということではございません、まず。

破壊靱性試験片の中で、まず、もともとあります、例えばASTM E1921ですとかE1820、それから、同等の規格が日本の中にもあるわけですけど、そこで寸法公差がどのように設定されたかということを確認いたしました。そうしますと、やはり、例えば1インチの試験片、0.5インチの試験片といった、そのくらいの大きさで加工で公差がリーズナブルなものになるということが基本になっておりまして、そこから設定されているということがわかりました。

その上で、今度は、この公差を少し緩和した場合に、実際に問題となります K_{Je} 、このデータにどれだけ影響が出るのかということ寸法をいろいろ変えた解析を行いまして、これが大変少ないということを確認いたしました。その大変少ないというのは、また基準になるのは先ほど説明しましたマスターカーブにおける T_0 の標準偏差に対しても10分の1とか、何十分の1という非常に小さい値であるということを確認いたしました。これで、倍にしても結果にはほとんど影響が出ないということを確認しまして、公差の緩和を提案して認められたということに、規格化につながったということでございます。

シャルピーからとるとということでございますけど、シャルピーの10×10の断面からとるのではなくて、亀裂の向きをシャルピーのノッチの向きに合わせますので、そうしますと、ワイヤカットで新たに削り出すこととなります。ですので、シャルピーの公差、あるいは誤差がそのまま響くということはありません。これが2点目です。

PWR Owners Groupの研究がどのようなものかということですが、これは、監視試験の終了したシャルピーの端材からミニチュアC(T)の試験片を削り出しまして、これを追加照射して80年相当まで照射させた状態で健全性の評価をしようというものでございます。

以上です。

○廣田副主査（日本電気協会） 最後の資料1-2-4でPTS評価のほうの20ページ、照射量の依存性があるのではないかということで、高照射領域の赤の点のデータで見ると、見た目だけしかちょっと定量的になかなか言いづらいところがございます、見ただけで言うと、圧延材と溶接金属は、そこそくないと言ってもいいんじゃないかなという判断をしたところなんですけど、これ以上ちょっと言いづらいところもありますので、次回、改めて御説明するようにしたいと思います。

○藤澤参与 ありがとうございます。藤澤です。

先ほどの山本さんの説明でシャルピーの話ですけど、資料1-2-2の25ページのほうに図があるんですけども、ミニチュア試験片は、このシャルピー試験片の端材からとるんですね。ですから、こういう向きでとるとということでもよろしいですね、25ページにある図のように。

○山本委員（日本電気協会） はい。

○藤澤参与 そうすると、やっぱりWという1.25Wに相当するところはシャルピー試験片の10×10という寸法にもろに関係していますので、私は、その寸法は、要するにシャルピー試験片の寸法、シャルピー試験そのまま使ったとしても 10 ± 0.075 ですから、そうしたら、

それと同じにすべきじゃないかと私は言ったんですけど。

この4mmという寸法は、10mmを二つに切ってやるので切断代も引いて4にしたと思うんですけど、当然、そこの面も新たにつくるんですけど、ここは、私はJISのシャルピー試験片がサブサイズでもって寸法許容差を決めているので、そのぐらいの加工は可能だというふうに思っています。であれば、それとしたらどうかと、わざわざ緩める必要はないというふうに思ったということで、これは、意見です。

以上です。

○山本委員（日本電気協会） 規格に定めているものは最大の許容誤差を定めているということですので、もちろんこのように、今回、監視試験ということに限って言えば、シャルピーからとると。そうすると、もともと寸法が出ているんですから自動的に、この公差はクリアされるということによろしいかと思えます。

シャルピーがきれいにできているからといって、このミニチュアC(T)の公差をそれに合わせて狭めなければいけないということは、ないと考えます。

○山中委員 そのほか、いかがでしょうか。よろしいでしょうか。

どうぞ。

○笠田教授 短いあれですけども、PTS評価のところ、弾性解析のほかには有限要素解析が許容されるように規格化をやられていますけれども、その有限要素解析の詳細はあまりなくて、結構投げられている感じになっていて、でも、やっぱり有限要素解析をすると弾塑性解析、あるいは大変形解析とかをすることによって、非保守型の評価になる方向に行くと思うのですけれども、それがあまり記載がないというのはちょっとどうなんだろうと思ったんですけど、その辺りはどうでしょう。

○廣田副主査（日本電気協会） それは、おっしゃるとおりだと思いますけれども、ちょっと今、この2016年度版の時点では応力ひずみ線図どうするかとか、その辺、結構効いてくると思うんですけど、そこまでのちょっと議論ができていないところがありまして、今、現段階ではこのような、これだけの規程にさせてもらっていて、将来的にはそういうような規程も入れ込むとか、その辺を検討したいというふうに思っております。

○沖田准教授 東大の沖田と申します。

笠田先生と同じようなところですが、今、最大仮想欠陥、深さ60mm、長さ10mmとされていますが、今後、非破壊検査等々に基づいては、これを合理的にしてよいと書いてあるんですが、どのような場合に、どの程度小さな欠陥まで、最大の仮想として取り込

む計画でしょうか。

○廣田副主査（日本電気協会） 規格上は、御説明しましたように、検出精度と疲労き裂進展量を踏まえて決めなさいというところになってはいますが、ちょっと今後、具体的にどうするかというのは、ちょっとまだこれから調整かなというふうに思っております。

○山中委員 そのほか、いかがでしょう。

○鬼沢センター付（日本原子力研究開発機構） 原子力機構の鬼沢です。

資料でいいますと1-2-4なんですけれども、 ΔT_t というのが材料ごとに3通り定められているというのが22とか23に具体的なデータとともに書かれているんですけれども、次回以降でいいんですけれども、この、 ΔT_t というのをどのように設定されたのかというのは説明していただけるとわかりやすいんじゃないかなと思います。圧延材で -15°C 、鍛鋼品で 8°C 、溶接金属で 14°C というふうにあって、例えばグラフが三つほどそれぞれ並んでいますけれども、それぞれ包絡率というのが少しずつ異なっているので、何か包絡率をぴったり合わせるように、 ΔT_t を決めたわけでもないようにも見えたので、その辺のところ、考え方を示していただければと思いますけれど、よろしいでしょうか。

○廣田副主査（日本電気協会） ΔT_t の設定の仕方は、マスターカーブと同じで、マスターカーブですと T_0 最尤推定法で決めるんですけれども、この場合ですと、 ΔT_t の値を最尤推定法で決めるという方法でやっています。ちょっと詳細は口頭でなかなか説明しづらいですので、次回、御説明するようにさせていただきます。

○山中委員 そのほか、いかがでしょう。よろしいでしょうか。

それでは、資料1-3に基づいて、原子炉压力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法等の技術評価に関する検討チームにおいて議論する内容について、佐々木企画調整官より説明をお願いいたします。

○佐々木企画調整官 原子力規制庁、佐々木です。

今回の技術評価に関して議論する内容について取りまとめましたので御意見をいただきたいと思います。

まず、技術評価の対象として、JEAC 4206のほうですけれども、2007年版からの変更点について基本的には技術評価を行うこととしたいと思います。ただ、今、議論がありましたように、大幅な変更がございますので、それに関連して変更がなかった点についても確認はさせていただきたいと思っています。

論点の一つ目ですけれども、PTS評価に用いる破壊靱性遷移曲線として新たな式を採用

したということについて議論したいと思います。これは、2007年版の K_{Ic} の式から2016年版の T_0 を用いたマスターカーブ、あるいは T_{r30} を用いたマスターカーブということに式が変わっていますので、この辺を議論したいと思います。

二つ目としましては、供用状態C、Dにおける最大仮想欠陥として2007年版では容器内面に10mm深さの欠陥を想定していたものを、ステンレスクラッド下に想定するというふうに変更したことについて。

三つ目としましては、PTS評価における非延性破壊発生に対する許容基準の変更ということで、 K_{Ic} 曲線と K_I との比較を今まで2007年版で行っていたものに対して、それを満足しない場合の、さっき説明がありましたが、WPS等の条件がついたことに関して議論をしたいと思います。

この②のところは、上記②とございますが、①の間違いですので、申し訳ございません。

それから、二つ目としましては、JEAC 4216については、初めて技術評価の対象になりますので、全規程について確認を行いたいと思います。

めくっていただきまして、検討チームにおいて議論する内容ということで、まず、第2回、次回の検討チーム会合で議論する内容としましては、JEAC 4206のPTS評価に用いる破壊靱性遷移曲線についてを取り上げさせていただきたいと思います。

めくっていただきまして、次のページに別添とございますけれども、この内容を日本電気協会さんへ説明をお願いしたいと思っております。

まず、(1)～(6)までございますけれども、まず(1)として、2007年版の式を2016年版の式に変更した理由と、変更にあたって検討した技術的内容について説明してください。先ほどちょっと口頭で変更した理由等ございましたけれども、検討した技術的内容についてはまだお聞きしていませんので、詳しく説明していただきたいと思います。説明には、式を変更したことにより実プラントでの値がどのように変わったのかということについても含んでいただきたいと思います。

それから2番目として、2016年版の式は、マスターカーブ法をもとにしてつくられておりますけれども、このマスターカーブ法が中性子照射脆化した材料にも適用できるかについて検討されていると思いますので、その検討を行ったときの技術的内容について説明してください。

3番目ですけれども、2007年版の式は、データの下限包絡線であったのに対して、今回の式は、確率分布の信頼下限5%としています。この変更の理由と変更にあたって検討し

た技術的内容について説明してください。さっきちょっと質問しましたけれども、その信頼下限5%とした理由というのを、1%と2%いろいろあると思いますけれども、どのような検討をして5という数字にしたのかという点と、下限を下回るデータの取り扱いということで、先ほど笠田先生からも御質問がありましたけれども、原子力の安全についてどうというふうに考えているのかということをお説明していただきたいというふうに思います。

それから、4番目ですけれども、2016年版の式を決める際に使ったデータについて説明してくださいということで、これらの式の適用範囲と関係すると思いますので、どのような広がりのあるデータでもって決められたのかについて教えていただきたいと思います。

それから5番目としまして、マスターカーブ法をもとにした式で T_{r30} を用いたものと、 T_0 を用いたものとございますけれども、この二つの式がありますので、曲線が二つ出てくるということになりますし、2007年版を考えれば三つあるということになりますけれども、どのような差異があるのかについて実例で示してください。これは、三つあったときにどのように考えればいいのかと、この三つの出てくる曲線をどのように考えればいいのかということに関して説明いただきたいというふうに思います。

それから6番目ですけれども、供用状態C、Dの評価に用いる式として、マスターカーブ法をもとにした式を導入していますが、供用状態A、Bには導入されていないと思いますので、それはなぜですかということをお説明してくださいというふうになっております。

前のページに戻っていただきまして、第3回検討チーム会合以降には、このようなことをお聞きしたいということをお記載してございます。

まず、2.2の(1)は4206のほうですけれども、供用状態C、Dにおける最大仮想欠陥の変更について、最大仮想欠陥を変更した理由と変更にあたって検討した技術的内容をお説明していただきたいということで、我々の説明していただきたい内容としては、計算に用いるクラッドの厚さは、実際にはどのようにして算出するのか。クラッド下亀裂の応力拡大係数の計算式について検討した内容。残留応力、材質及び希釈域について検討した内容を含んでいただきたいと思います。

それから②でございますが、PTS評価における許容基準の変更については、同じように変更した理由と変更にあたって検討した技術的内容ということで、特にWPS、それから容器の板厚75%以下にしたときに、それぞれ検討した内容について御説明いただきたいと思っております。

③番としまして、供用状態A、Bに関して変更した点と変更しなかった点がございまして

で、この両方について御説明いただきたいと思っております、供用状態C、Dについてはクラッドを考慮することとし、A、Bについては考慮しなかった理由は何でしょうかということです。それから、圧力・温度制限を設定する際には、 RT_{NDT} を RT_{T0} でもよいとした変更の理由と、この検討をしたときの技術的内容について説明してください。

それから(2)としまして、4216のほうですけれども、先ほど来から議論になっております試験片の寸法効果等について検討した内容、この内容には照射材について行った検討の範囲等についても含んでいただきたいと思っております。

それから②として、参照温度[T_0]の決定における試験体のサンプル数ですね、これについて検討した内容。

③番目として、複数試験温度について K_0 や K_{Tc} を算出するわけですけれども、これについて検討した内容について説明していただきたいと思っております。

それから、三つ目に、もう一つの規格であります原子炉構造材の監視試験方法との関連として質問がございますので、規格で説明させていただきたいと思っております。

お手元の4206の2016年版の17ページを開いていただけますでしょうか。ここには、一般評価の評価手順ということで、一番右側に T_{r30} または T_0 から矢印が下に行っておりますけれども、この横のところに国内脆化予測法による靱性低下予測というふうに書いてございます。これを用いて K_{Tc} を設定するというようになっておりますけれども、 T_{r30} はあれですけれども、 T_0 についてはどのような検討をしたのかについて御説明いただければと思います。

以上でございます。

○山中委員 資料1-3について、質問、コメントございますか。よろしいでしょうか。

どうぞ。

○山本委員（日本電気協会） すみません、細かい点で恐縮なんですけど、この2.(2)の②の必要サンプル数についてというのをもう少し詳しく御説明いただけるでしょうか。何を御説明すればよろしいですか。

○佐々木企画調整官 原子力規制庁、佐々木です。

この比較には、 T_0 を決定するときサンプル数が6だったり8だったりということで規定されていますけれども、そのサンプル数で十分なのかということをごどのように検討されたのかということをご説明いただきたいと思っております。

○山本委員（日本電気協会） わかりました。

○山中委員 そのほか、いかがでしょう。

○平野主査（日本電気協会） 破壊靱性検討会の平野です。

別添の(6)で、供用状態A、Bにはマスターカーブ法を導入しなかった理由を説明とあるんですけど、PTS評価は、もともと違う評価をしていたので、その評価を見直したときに、たまたま今まで使っていた下限のかわりにマスターカーブのカーブを使ったということで、供用状態A、Bについては変更の必要性を認めていなかったの、今回、変更していないという理由しか示せないんですが、そういう説明でよろしいんですか。

○佐々木企画調整官 原子力規制庁、佐々木です。

先ほどの説明からすると、マスターカーブ法を使ったほうがよい結果が得られるというのですか、より精度の高いものになるという説明だったと思うので、両方に導入してもよかったですんじゃないのかと思いますけど。

○平野主査（日本電気協会） 破壊靱性データというのは、PWRしか監視試験に入っていないので、PTSでやられているような、ああいう評価はBWR側でやっていない、できないということで、BWRのほうのデータは入っていないんです、今回のPTSでやったときの評価というのは。

なので、全体に広げるのではなく、PWRを対象として、今回、PTSに対する評価を新しくしようということで、そのカーブとしてマスターカーブを使ったのみで、マスターカーブで精緻になると言っているのは、初期値を与える RT_{NDT} のかわりに使えばいいというのがもちろんありますが、もちろん運転プラントしか今ないので、新規のプラントを建設するのであれば、もちろんそういうことを前面に出していきたいんですが、今ないので、そういう意味で、運転プラントを考えた場合にはPTSのほうでなるといことなので、全面展開するにはちょっとちゅうちょがあって、現実的に材料が残っていないと初期の T_0 をとれないので、評価に使えないわけです。というのもあるので、そういう全体的なことで、今回、供用状態A、Bについては、基本評価のカーブは変えないというふうにしてPTSだけ見直したということなので、新たに説明してくださいと言われるとちょっと困るんですが。

○佐々木企画調整官 原子力規制庁、佐々木です。

この質問については、技術的な説明をしてくださいというつもりではありませんので、今おっしゃったことを説明していただければと思います。

○山中委員 そのほか、いかがでしょう。よろしいでしょうか。

それでは、本日の議題は以上でございますが、全体を通して何か質問とかコメントござ

いますでしょうか。よろしいでしょうか。

本日、御説明いただいた内容のうち、さらに説明を求めたい点があるかと思えます。その内容について事務局から改めて確認をお願いいたします。

○佐々木企画調整官 原子力規制庁、佐々木です。

今日御議論いただいた外部専門家の皆様の関心がミニ試験片のほうに結構あったというふうに理解しました。特に材料の均質性ですとか、そういったところですか、あと、今回の項目に出てきませんでしたけれども、PTSの有限要素を用いるときの規定をこの程度でいいのかといったようなことがございましたので、いただいた御意見は、多分、今回の議論する内容の中では第3回以降で議論する内容というふうに整理できると思えますので、いただきました御意見を取り込んで具体的な質問内容をつくらせていただきたいというふうに思います。

○山中委員 そのほか、何か全体を通じて質問、コメント、あるいは、確認をしておきたいような点ございますか。よろしいでしょうか。

特にないようですので、以上で議論を終了したいと思います。

次回の第2回会合は、9月6日金曜日の開催を予定しております。開始時間、場所については、追って事務局から調整、連絡をさせていただきたいと思えます。

以上で第1回原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法等の技術評価に関する検討チームを終了したいと思います。