

第 2 3 回 供用適性評価規格委員会、  
第 6 回 高度化検討分科会 合同会議  
議事録（案）

1. 日時：令和 3 年 11 月 15 日（月） 10：00～12：30
2. 場所：現地開催（高圧ガス保安協会第 1・2 会議室）及び WEB 開催の併用
3. 出席者（敬称略・順不同）：  
供用適性評価規格委員会委員：鴻巣（委員長）、小川（副委員長）、中曽根（副委員長）、酒井、三浦（晃）、渡辺、鬼木、佐藤、木曾、弥富、島川、森村、松本、保坂  
高度化検討委員会委員：高橋（副主査）、渡邊、小山、鶴澤、中川  
オブザーバ：小林（KHK 参与）、三浦（安）（石連）、石崎（出光興産）、大谷（ENEOS）、藤本（石化協）、岡山（出光興産）、佐野（サイサン）  
METI 高圧ガス保安室：苗村審議官、佐藤保安室長、畑山専門職  
KHK：近藤会長、久本理事、鈴木理事、越野理事、小山田、名倉、磯村、宮下、大野、岸川、矢吹、佐藤、長島、菊田
4. 配布資料：  
資料 1 論点整理と取り纏めの方向性に関する事務局提案  
（p-M 法からの説明資料）  
資料 2-1 石連・石化の主張への反論  
資料 2-2 p-M 法と API 法の算定応力の検証  
資料 2-3 p-M 法の基準案とデータ検証  
（基準改正案）  
資料 3-1 0851 本文新旧対照表（き裂）  
資料 3-2 附属書 11-2\_き裂第 2 段階評価フロー図  
資料 3-3 附属書 11-2\_き裂第 2 段階評価  
資料 3-4 本文図 2.5 き裂フロー図改正案  
資料 3-5 0851 本文新旧対照表（減肉 II）  
資料 3-5-1 単独欠陥  
資料 3-5-2 複数欠陥 (Overlap 以外)  
資料 3-5-3 複数欠陥 (Overlap)  
資料 3-5-4 曲げ管 (面内曲げ)  
資料 3-5-5 曲げ管 (面外曲げ)

資料3-5-6 ノズル近傍

資料3-6 新旧対照表(溶接補

資料3-7 附属書案「溶接補修後の耐圧試験の省略(規定)」

(APIからの説明資料)

資料4 【本文】 供用適性評価規格へのWES2820(API法)採用について

資料4-1 API法に基づく減肉評価方法(WES2820)の提案

資料4-2 附属書 5B 減肉の評価区分IIの供用適性評価;WES2820に基づく場合(案).

資料4-3 評価限界温度におけるFEM評価結果について

## 5. 参考資料:

参考資料1-1 供用適性評価規格委員会、高度化検討分科会委員名簿

参考資料1-2 参加者名簿

参考資料1-3 第22回供用適性評価規格委員会\_議事録

参考資料1-4 第5回高度化検討分科会議事録

参考資料2-1 経済産業省委託事業の成果概要について\_H25. 7. 29

参考資料2-2 第1回高度化検討分科会 資料2\_高度化検討の方向性について(案)

参考資料 2-3 分科会 資料 6-2\_ 附属書 5 減肉 II\_構成と根拠

## 6. 議事

### 6. 1 (1) 開会 (2) 資料確認

鈴木理事、石連 三浦様、石化協 藤本様から、委員会の冒頭に以下のとおり発言があった。その後、事務局から資料確認があった。

○おはようございます。冒頭ではありますけども、本日の会議に至るまでの経緯と、それから今日合同会議とした理由について事務局からまず申し上げます。昨年8月28日に第22回供用適性評価規格委員会を開催いたしました。その後9月29日に論文検討会。年が明けまして本年の7月7日に第5回の高度化検討分科会開催をいたしました。この第5回分科会の後、経済産業省の佐藤室長立会いのもと、p-M側、API側と論点の整理を行いました。その結果を踏まえまして、去る10月13日に第6回分科会を開催する予定でしたが、今後の進め方につきまして事務局内で調整が付きませんでしたため、前日にキャンセルをして延期することといたしました。分科会の委員はじめ関係者にこの場を借りてお詫びを申し上げます。その後、改めて進め方を整理して今日の会議を迎えることになりました。また今回親委員会と分科会の合同会議とした理由は主に二つございます。一つ目は経済産業省の審議会であります高圧ガス小委員会が10月25日に開催されました。本件について年内に結論を得るという方向性が示されたため、議論を加速する必要があるというのが一つ目。二つ目は先ほども申し上げましたが7月以降 p-M側と API側で論点の整理をして参りましたが、その結果といたしまして、これは

また後ほど事務局から説明をいたしますけども、事務局としましてはp-M、APIの両論併記が可能ではないかというふうに考えるに至ったことであります。これは大きな方向性の問題ということになりますので、早期にこの規格委員会を交えて議論する必要がある。というのが理由の二つ目であります。

以上、今日の会議に至った経緯と合同会議とした理由をご説明させていただきました。本日は技術的な論点について活発な議論をお願いしたいと思います。以上です。

○オブザーバの石油連盟三浦でございます。ただいまの鈴木理事のご説明を受けて発言させていただきます。産業界といたしましては、石連は石化協さんとともに実用的なFFS規格の制定につきまして、長年、その検討に協力させていただいております。

特に減肉に関する実用性の高い供用適性評価規格については、一刻も早い発行の実現が事業者の悲願であります。これまでの本件に関わる関係者の皆様のご努力に大変感謝申し上げますとともに、業界といたしましても、引き続き現実的な解決への取り組みに参画、尽力して参りたいと思っておりますのでどうぞよろしく願いいたします。以上でございます。

○石油化学工業協会技術部の藤本でございます。ただいま石油連盟の三浦部長よりお話があったとおり、石油化学工業協会としても全会員企業の総意といたしまして、ぜひ迅速な本規格の取り進めをお願いしたいと思います。是非宜しく願いいたします。

## 6. 2 議題（3）について

KHK越野理事より、資料1に基づいて説明があった。その後、高橋副主査よりコメントがあった。

○おはようございます。今日はお忙しいところお集まりいただきましてありがとうございます。またWebでの参加もして頂きましてありがとうございます。METIやKHK会長にも、安全を第一に建設的な議論をと言頂いておりますので、皆さんに活発な議論をよろしく願いしたいと思います。

それでは配布されている議事に則って本日の会議を進めたいと思っております。会議を進める前に、開催案内メールまたは本日出席者の方へは事前に配布しております委員等倫理心得を遵守いただくことになっておりますのでお願いします。委員倫理心得の方は良心に従って発言していただきたいということです。議題の3から5まで説明していただいたうえで議論質疑を行う形で進めさせていただきます。それでは、議事次第にあるようにまず論点整理と取りまとめの方向性に関する事務局提案についてKHK 越野理事よりご説明をお願いします。ただ20分ということになっていきますけれど、スケジュールがタイトなのでできるだけ短く、よろしく願いいたします。

○（資料 1 P1）高圧ガス保安協会の越野でございます。事務局から減肉評価の論点整理と取りまとめの方向性に関する提案についてご説明致します。

（P2）これまで p-M 法と API 法については多くの議論を重ねてまいりました。その中で主な論点が 3 点ございます。ここに示しておりますように一点目は  $M_s$  の定義/参照応力の定義であります。つまり溶接部（のちに減肉部と訂正。）にかかる応力をどのように評価するかという点であります。2 点目は塑性崩壊条件の定義、つまりどのような応力状態になった場合を限界とするかというところであります。3 点目は許容基準の考え方。先ほどの限界の参照応力に対して、許容基準をどのように設定し安全裕度を確保するか。この 3 点でございます。

（P3）まず参照応力について、参照応力は健全部の応力を補正して欠陥部、減肉部にかかる応力を評価するものであります。これは両法とも同じであります。その中で p-M 法は右上の図にあります降伏点までの弾性域の弾性解析をもとに減肉部にかかる応力を算定する方法であります。それに対しまして API 法は、この降伏点を越えて塑性域を含めての弾塑性解析をもとに溶接部（のちに減肉部と訂正。）の近傍にある健全部の補強効果も考慮に入れて減肉部の応力を評価する方法でございます。この点で両者が少し違ってございます。

（P4）続きまして二点目、塑性崩壊条件について比較してみます。ここでは内面に減肉を有する内圧容器の変形について示しています。この図の縦軸が内圧、横軸がひずみ、変形量であります。下の方から内圧を徐々に上げていきますと、まず減肉部の内面のところから降伏して、減肉部全断面において降伏する。これが②の状態でございます。その②の状態を p-M 法では塑性崩壊、限界であると考えてございます。さらに内圧を上げていきますと、③のところでは減肉部の近傍の健全部も降伏し、さらに④のところでは健全部、全断面において降伏し、さらには⑤のところでは減肉部が破壊を開始する塑性崩壊に至る流動応力に達する。この時点を API 法では限界、塑性崩壊と考えてございます。このような違いがございます。

（P5）改めて両法を比較してみます。参照応力と申しますのは健全部に作用する応力  $\sigma_m$  に係数を乗じて減肉部の応力を評価する方法であります。左の p-M 法では  $M_s$ 、ここでは詳細は  $M_s^{Chell}$  でございますが、板材から円筒の式へ変換するための補正係数である  $M_s$  を乗じてさらに断面積減少による増分、 $1/(1-\alpha)$ 、これも乗じて参照応力を出すというのが p-M 法であります。それに対して API 法の  $M_s$  は  $M_s^{Kiefner}$  と呼ばれております。欠陥のある容器の限界圧力と健全な容器の限界圧力の比、つまり流動応力の比を示すものであります。従いまして、断面積の影響も考慮されており、この  $M_s^{Kiefner}$  を乗じることによって欠陥部の参照応力を出す。このように両者の  $M_s$  は補正係数であります。その算出方法が違っております。

（P6）繰り返しのようになりますが、塑性崩壊条件であります。p-M 法の方は、参照応力は先ほどの②の位置であった、減肉部が全断面において降伏するような状態を限界と考えてございます。右側の API 法は、減肉部がその周辺の健全部の補強効果を受けることも考慮して、減肉部が全断面降伏する状態、つまり流動応力になる状態を限界と考えています。それぞれについて、p-M 法では参照応力を減肉部が全面降伏するデータと合うことを検証しています。API 法におきましても、参照応力が破裂試験データと合うことを検証してございます。このように両者ともに参照応力

の算定結果を検証してございます。

(P7) 3つ目の論点でございます、許容基準の考え方。一般的に設計上の許容応力は、特定則等々では引張強さの1/4、降伏点の1/1.5を用いることになってございます。つまり引張強さについては安全裕度4倍、降伏点につきましては安全裕度1.5倍をとっています。一方、API法、これは維持基準でございますので、先ほどの設計上の許容応力に対して1.1倍を確保するというのを規定してございます。つまりAPI法につきましては、引張強さは3.6倍、降伏点については1.35倍の安全裕度を持っていることとなります。それに対してp-M法は、引張強さの規定がなく、降伏点については必ず降伏点の1.5倍を確保するという規定になってございます。従いまして、右に示しておりますように、一例としてAPI法の許容応力は、常温からある温度までは引張強さについて3.6倍の安全裕度を持たせるということでp-M法に比較して許容応力が低く保守側の評価となります。さらに温度が上がってくると逆に、金属材料は温度が上がってくると降伏点が低下してくるので、ある温度以上になると降伏点に対して1.5倍の安全裕度を持たせているp-M法の方が、許容応力値が低くなってまいりまして、保守的な評価結果になるという、関係がございまして。

(P8) 繰り返しになりますが、まとめますと、p-M法は限界の参照応力に対して降伏強さで1.5倍の安全裕度を持たせております。API法におきましては、限界の参照応力に対しまして引張強さで3.6倍、降伏点で1.35倍、これだけの安全裕度を持たせてございます。

(P9) 事務局からご提案をまとめさせていただきます。減肉評価におけるp-M法とAPI法を比較すると大きく3つの論点がございまして、1点目は $M_s$ および参照応力の定義、つまり減肉部にかかる応力をどのように算定するかであります。2点目は塑性崩壊条件の定義、つまりどのような応力状態を限界とみなすかであります。3点目はその限界の参照応力に対してどのように許容基準を設定して安全裕度を持たせるかという、この3点であります。この3つの論点につきましては両法ともに手法並びに考え方は異なりますが、それぞれ参照応力、許容応力に対してFEM解析や破裂試験で検証が行われております。さらにそれぞれの考え方で安全裕度も確保されておりますので、両論併記が可能ではないかと考えております。なお、いずれの評価法を適用するかについては、3つの論点を含めた評価方法の違いを十分に理解した上で、対象設備の使用条件と対象部位の減肉状態を十分に把握できている事業者が判断して選択すべきだと考えております。本日はこれから以上3つの論点を中心に事務局からの両論併記の提案についてご議論いただきたくお願いいたします。

○予定が変えられず申し訳ありません。このような状況において事務局が今説明した案は非常に現実的ではないかと思っている。個人的には一点だけ、最後のスライドに書かれていた、事業者の責任においてというのが非常に必要であると思っています。これさえあれば今の案が現実的だと思っています。これからの議論に参加できなくて非常に申し訳ないのですけれども、いろいろな意見が出てくると思うのですが、その意見というのは安全性を考えたうえで心配される点かと思うのですが、ぜひ事業者が規格を使用するときに安全を確保するための参考として付

け加える、情報提供するような形で規格を作れば、現実的な形で落ち着くのではないか。やはり補修ができるようになるということが非常に産業界においては重要だというのは認識しておりますので、ぜひうまく収まってくれればと思っています。以上です。

#### 6. 3 (4) p-M法からの説明

KHK小山田から、資料2-1～2-3に基づいて説明があった。

○それではスケジュールに従い、p-M法側からの説明についてKHKの小山田様から20分以内でご説明をお願いします。

○(資料2-2 P1)小山田でございます。今画面の方を資料2-2に切り替えさせていただきます。まず、資料で、p-M法について3つございますけれども、資料の2-1は鴻巣委員長からの石連石化の主張への反論という資料ですが、こちらは後ほどの質疑で用いられるものでございますので説明は割愛させていただきます。私の方からは資料2-2をp-M法を主張する側からということでご説明させていただきます。また併せて資料2-3の基準改正案につきましては、事務局としての私の方から最後に簡単にご説明させていただきたいと思っております。まず資料2-2、p-M法とAPI法による評価の相違とデータ検証ということでございます。

(P2) こちらの資料の概要でございますが、p-M法とAPI法と2つ減肉の評価方法があるわけでございますが、この評価結果が同じ減肉を対象としても大きく異なるということでございます。このp-M法とAPI法のそれぞれの評価結果自体を比較しても何がどうなのかということになりますので、実験、FEM解析で減肉にどれぐらいの力が働いているかというデータがございますので、それとp-M法、API法の評価結果がどのようになっているかという比較を行ったということでございます。3点目でございますけれども、結論になりますがAPI法について減肉部位に発生する応力が実際の発生応力、これがFEMや実験等で確認された応力ということになりますが、それよりも小さく評価されるということ、特に円筒容器の内径が大きくなるとそのことが顕著になるとということが確認できたということでございます。

(P3) 検証事例3つご用意いたしました。まず事例①ということで、7月7日開催の第5回高度化検討分科会の資料1-2のスライド28の内容ですが、内半径が234.5mm、直径がだいたい50cm弱のものということでございます。ここに欠陥長さが30mmというケースでスライド28では検証されておりましたが、さらに300mmのケースもFEM解析を実施しまして、それとの比較を行っております。事例②というのは、少々古い資料になりますが、下名が書いたIJPVP2011論文の中で実験とFEM解析の結果がございますので、それとの比較でございます。右端にあります、内半径が7cm程度ということで、直径が15cm強の比較的細い配管ということになります。事例③は古い話で恐縮ですが、平成20年に開催されました第7回本委員会の資料51というところで、p-M法はないですけれども、API法とFEMの解析結果を比較したものがございまして、半径がだいたい1m、直径が2mぐらいの内径のものということで、事例①に比べますと大きな径になると

ということでございます。まず事例①から説明させていただきます。

(P5) 資料 1-2 スライド 28 ということで、左の方に図が出ていますが、この図は縦軸が参照応力、周方向応力でございますけれども、こちらの方を示しております、横軸は円筒の内半径、右に行けば行くほど大きな半径になるというものでございます。赤い実線が API 法の参照応力になるわけでございますけれども、今ご覧いただくと赤い実線で径が大きくなるとだんだん小さくなりまして、欠陥から離れた部位の健全部の膜応力に一致してしまうという結果になるということをご指摘している資料でございます。その中で直径が 50cm 程度の赤い矢印が右に伸びているところの部分でございますが、この API 法、WES 法で許容応力、要は許容される欠陥として、径がだいたい 50cm 弱のところ出てくるわけですが、その部分について FEM で検証したというのが事例①-1。事例①-2 は、軸方向の欠陥長さがだいたい 3cm 程度の小さい欠陥で検討しているわけですが、それを 10 倍の 30cm 程度に伸ばしたもので検証してみたということでございます。

(P6) 事例①-1、P5 で言っていた API 法が合格するところでの FEM の検証結果がこの上の表でございます。p-M 法、API 法と FEM 解析ということで、FEM 解析で実施したところ、160N/mm<sup>2</sup>程度の応力ということでございます。API 法では許容応力でございます、合格しているということになりますけれども 111.1 N/mm<sup>2</sup>ということである。FEM 解析が正だとしますと、それよりは小さい応力として算定しているという結果でございます。p-M 法の方はどうかと言いますと 181.6 N/mm<sup>2</sup>ということになりまして、FEM 解析よりも高めの数字、安全サイドの数字が出ているということでございます。黄色く塗ってございますけれども、API 法は減肉部の応力を FEM 解析の結果より低く算定していると。これについてはこの規格ユーザーが過小評価、誤認をしないようにする必要があるのでないかということを書かせていただいております。

(P7) その FEM 解析を実際に行ってみたところでございますが、ここでは 350°C の結果のみを示しております。

(P8) このスライドが 2.55MPa、これが p-M 法で許容される圧力ということになりますが、ご覧いただいたように、減肉部も弾性域にとどまっているということで、p-M 法での許容限界に合っているということでもあります。

(P9) API 法の方は、4.15MPa で許容限界ということになり、若干高い圧力の結果ということになりますけれども、解析の昇圧の速度上、ぴったりにはならなかったということで、少し高いところで示させて頂いておりますけれども、この結果からこの黄色い部分が大体 165 N/mm<sup>2</sup>程度の応力ということで、先ほどあった API 法で算定した 111.1 N/mm<sup>2</sup>よりはかなり高い応力が出ていることが分かるということでございます。

(P10) その応力分布を示したものがこのスライドでございます。160 N/mm<sup>2</sup>というのはどこかということでございますけれども、断面に沿って右斜めに赤い矢印が入ってましてその斜めの応力分布が右の各断面の応力分布というところの赤いラインになりまして、内面側が一番左で、欠陥の底部、つまり表面に向かってその断面の応力を採ったところ、だいたい全て 160 N/mm<sup>2</sup>以上となりましたので 160 N/mm<sup>2</sup>と書いてございます。その他の断面がどうなっているかという、

減肉の中央部が一番内側の青い上向きの矢印になりますが、だいたい一番内側で 140 N/mm<sup>2</sup>ちょっとくらいから 120 N/mm<sup>2</sup>程度に下がってさらに 160 N/mm<sup>2</sup>程度に上がる。紫の真ん中ぐらい、1/4 モデルでございますので 1/4 程度のところになるということですが、そちらの方は 120 N/mm<sup>2</sup>からだんだん上がってきて 160 N/mm<sup>2</sup>ぐらいになるということで、160 N/mm<sup>2</sup>というのはこのコーナ部分の一番応力が高いところを示しておりますが、その他の部分も含めても 111 N/mm<sup>2</sup>という数値はちょっと小さいのではないかとということが確認できたということでございます。

(P11) この応力分布を、今度はその軸方向にどうなっているかというのを確認したものでございます。その黒い丸は減肉の底部の中央部ですね、この内面側を軸方向に取ったものと、先ほどの一番応力が高い、断面に渡って 160 N/mm<sup>2</sup>と出たところが赤い点線のところの部分の軸方向の応力分布ということで、これをとりますと右のグラフのようになりまして、これは半楕円の減肉となるので、だんだんその応力は当然緩和されるというところで、一番薄いところで、先ほどの 160 N/mm<sup>2</sup>出ていたところですよと 160 N/mm<sup>2</sup>からは若干上に上がって下がっていくというような感じでございます。減肉の中央部のところですよと 140 N/mm<sup>2</sup>ちょっとのところからだんだん下がって膜応力に漸近していくというところでございます。下のところで減肉範囲と書いてございますけれども、減肉範囲ぐらいでだいたい応力が下がっていくことが確認できていると。その下の Willoughby の範囲というのが、p-M 法で用いている欠陥部の等価と見る範囲でございますけれども、これがこの緑の矢印のところをだいたい収まっておりまして、Willoughby の範囲というのは応力の上がっている分を見るのには適切な範囲とされているのではないかと考えられます。構造不連続部の  $1.8\sqrt{D_i t}$  というのは、石連石化の方からこの範囲で収まっているというご説明がありましたが、このグラフを見ていただきますと、かなり大きな範囲ということになりまして、減肉部の応力の上昇範囲との  $1.8\sqrt{D_i t}$  は関係が見えないのではないかと結果を示しているということでございます。こちらの方 Mises 応力分布ということで、膜応力、グラフの一番右のほうに行くとだいたい 90 少々で収まっていますが、Mises 応力ですので、膜応力は 100 ですが Mises 応力は  $\sqrt{3}/2$  になるということで、ちょっと下がっていることでございます。

(P12) このスライドがそれを膜応力に変えた形ということで、こちらの方は先ほどのところが 100 に収まるということで、同じような傾向でございます。

(P13) 350°C、4.65MPa で全断面降伏しているということで、次のスライドで示しておりますが先ほど斜めの 160 N/mm<sup>2</sup>というところをとった断面のところでも全断面降伏をしておりまして、そこが一番弱い断面というふうに考えまして、その断面の 160 N/mm<sup>2</sup>というのを取ったということでございます。

(P14) 次に事例①-2 ということで今度は減肉長さが 300mm に伸ばした場合でございます。こちらの方は FEM 解析で 1.8MPa で全断面降伏しておりますので、1.8MPa、164 N/mm<sup>2</sup>が降伏点でございますけど、350°Cでの降伏点になるということでございます。これに対して API 法の方は下に計算が書いてございますが、再定格をして圧力を下げて使うと合格範囲が出てくるということですが、2.1MPa で 111N/mm<sup>2</sup>ということになると、2.1MPa まで使ってしまうということで、この FEM 解析による降伏点ベースの全断面降伏を超えているということでございます。p-M 法につき



ましては、0.86MPa、164N/mm<sup>2</sup>で降伏するということになりますので、FEM解析よりは安全サイドということでございます。黄色のところを書いてございますが、API法の規格ユーザーが全断面降伏に気付かない恐れがあることでございます。

(P15～) それを示したコンター図が続いております。飛ばさせていただきます。

(P23) 検証事例②でございますけれども、比較的径が小さい配管での結果ということで、こちらのグラフになりますけれども、この実験が青い点線で、FEMが赤い点線でございます。これが縦軸で1のところとの交点のところまで全断面降伏しているということになります。それでp-M法のピンクのラインはだいたい一致しているということですが、API法、茶色い二点鎖線のところになりますけれども、こちらの方はやはり応力が小さく出ているということが確認されているということでございます。径が小さくなくてもこの傾向は変わっていないことを示しております。

(P24～) 事例③について、古い資料で恐縮ですが、第7回委員会の資料ということで、ケース1, 2に対してこの解析を実施して、API法で合格する欠陥ということでございます。こちらの方もAPI法では減肉部の応力を小さく評価しております。欠陥深さが深いほど誤差が大きくなる傾向がありますが、欠陥が浅くても実際より小さめということでございます。こちらの方200℃の結果ということで、径が大きくなりますとこの小さくなる割合が大きくなりますので、この場合ですと200℃でもほとんど降伏しているという状態がFEM解析で分かっているということでございます。資料2-1は以上でございます。

資料2-3は共有を割愛させていただきますが、資料2-3のほうはp-M法の基準案と委託事業データ検証ということで、このp-M法ですね、対象が普通の直管部と曲げ管の複数欠陥またノズル近傍ということでございまして、それぞれ本日資料としまして、規格案を資料3-5-1から3-5-6ということでお配りしております。各論文でデータ検証が行われているわけですが、その論文でのデータ検証、この内圧と曲げモーメントがかかるケースそれぞれにつきまして、データ検証がされております。安全に用いることができるということでございます。降伏点の1.5という安全裕度の中で十分使えるようになっているということが示されているというものでございます。それぞれのデータにつきましては経済産業省の委託事業で採取したデータが用いられているということでございます。その他、本日この資料3-1から3-4のところでき裂状欠陥の評価方法。また資料3-6と3-7で溶接補修時の耐圧試験の要否に関する改正案というものを示しております。参考資料の2-2で高度化検討の方向性というのがございまして、4つの課題がございます。参考資料2-2 1. の箱囲いの(4)の検査周期設定係数0.8というのは、スーパー認定と認定のインセンティブになりましたのでペンディングということになりまして、今この(1)評価区分Ⅱの減肉評価法の取り入れ、(2)溶接補修後の耐圧試験の要否等に関する規定の見直し・高度化、(3)き裂状欠陥評価法第2段階評価(HPISZ101-2)の追加導入ということで、前回までの規格委員会と第4回までの高度化検討分科会ではこの方向性で進めるということになってございまして、前回の議事録にも、p-M法とHPISZ101を進めてくださいということになっておりましたので、それらの基準案を本日お示ししたということでございます。こちらの今後の取り扱いにつきましても本日議

論いただければということでお示した基準案ということでございます。以上でございます。

#### 6. 4 議題（5）API法からの説明

石油連盟及び石油化学工業協会を代表して、出光興産株式会社の石崎様から、資料4-2に基づいて説明があった。その後、石油連盟 三浦様よりコメントがあった。

○続きまして、API法側からの説明につきまして、出光興産の石崎様の方から説明を20分以内でお願いいたします。

○（P1）石連石化を代表して私出光興産の石崎の方からAPI法についてご説明させていただければと思います。

（P2）本日提案する内容でございますけれども配布資料4-2に書いている通りでございます。貴協会の技術基準策定プロセスにしたがってAPI法に準拠した国内減肉評価規格であるWES2820をKHKS0851の附属書の中にWES2820最新版規格に従うという趣旨で引用していただいて、採用していただきたいと提案いたします。そのWES2820の減肉評価の概要ですけれども、一つ目、減肉評価に特化した評価規格でございます。き裂と減肉は三軸拘束とJ積分の部分が違ってきます。この点を踏まえてき裂評価と減肉評価を区分するために寸法制限規定が設けられております。二つ目、API579のpart4、part5とほぼ同等の減肉評価規定となっております。APIの方は安全性に実績があることはスライドの25枚目でいろいろな事業所から確認している通り、20年以上皆さん使っていて何の問題もございませんという実績を持っています。WES2820は既に民間規格として活用されておまして、細かい日本語の規定表現等を含め、実運用解釈に支障がないことは検証しております。本年もまた若干アップデートがされる予定となっております。RSF=0.9、すなわち10%だけストレスのオーバーを認めてくださいというルールになっておまして、事業者はFFS適用箇所について、その前提として継続監視、管理、適切な時期の補修の検討というのを行っていきますので、10%で安全は担保されるという考え方になっております。この規格自体がISOに認められた規格になりますので、著作権はISOに帰属しておまして、規格の一部または全部を他の所にそのまま使っちゃいけませんとなっておりますので、あくまでも引用した形にしてくださいというのがWESの事務局と相談した結果ですので、そういった提案をしております。

（P3）ただし日本国内の場合耐震設計基準がありまして、場合によっては耐震設計のところが引っかかってくるケースがごくまれにある。考え方としては、レベル1については合格値に対してRSF=0.9は適用しませんよということで、10%オーバーのところは考えません。しっかり耐震設計の許容応力を守るという評価方法規定にさせていただければと思います。その内容については附属書の中に一言書けばよろしいということで本日の資料の4-2の中に書いている通りということでございます。もう一つ圧縮側の耐震設計許容応力を求めるときには、引張に対する許容応力とは違い、圧縮に対する許容応力は当該部の厚みに左右されます。従ってイニシャルから

あった厚みとは違いますから、減肉部の残厚みに基づいてくださいということで、規定を考えております。この辺はHPIS-Z109でも議論している通りの考え方です。ただしレベル2については歪みで計算、詳細検討しているのので、これに対してWES2820は適用除外、あくまでも設計検討時の肉厚を守ることという形で運用させていただければと考えております。本日WES2820をお配りしたいところですが、著作権の問題があるということでしたのでこのショートカットのところ無償での閲覧ができますので見ていただければと思います。WES2820の評価方法の概要ですが、最初STEP1として全面減肉評価を行って、全面減肉評価についてはまた後でご説明いたしますけれども、平均厚みの10%アンダーまでということで考えてやります。STEP2では、全面と書いてしまったが誤記で、局部減肉評価でございます。局部減肉評価とは何者かという、減肉した周辺に残存している健全部がありますので、その部分の補強効果も含めて計算しましょうということで、RSFというのが先ほど越野理事が紹介していただいた $M_s$ というファクターの逆数になりますが、その0.9以上ですよという計算の仕方をしまして、比率で計算しましょう。STEP3として最終的な供用の可否を判断しますよというふうになっています。適用範囲はここにあるとおり、腐食、摩耗、エロージョン・コロージョン、発見傷をグラインダー等で滑らかにしたもので、寸法制限としては深さと幅を比べたときに幅の方が広いものを減肉にしましょうということになっています。このクライテリアについては2012年にAndersonとかが論文を出している通り。次の圧力設備にはしませんということで、クリープ、疲労、外圧を受けるもの、残存厚さが公称厚さの2割未満、配管は1.3mm未満と規定しています。2割未満の根拠については後で説明いたします。それから先端の鋭い傷、これはき裂になります。適用の種類は右の表のとおりとなっております。

(P5) 残存強度係数による評価ということでございます。何度もご説明申し上げている通り健全な容器と減肉容器の限界圧力の比です。全面減肉の場合は必要肉厚に対して残存肉厚の比率に単純になりまして、周辺の健全部補強効果を考えません。局部の時はこれから出てくる $M_s^{Kiefner}$ という式を使いまして、周辺の健全部もカウントした計算をしまして健全容器と減肉容器の限界圧力の比が0.9以上なら合格として評価します。0.9の意味は実際の使用域があって設計圧力を1.0とすると、健全容器のあの破壊限界圧が大体3倍+ $\alpha$ 、3.5~3.7になるが、これに対して10%アンダーということで、2.7倍+ $\alpha$ というところまでというイメージになります。合格基準値はRSF=0.9って言うような形で考えています。ただしこの10%アンダーを認めることは、放置するという意味ではありません。余寿命管理というのが規格の中にありますのでしっかり管理をやることで10%はカバーしますという考え方でございます。

(P6) 続いて係数 $M_s$ の基礎となる係数 $M_t$ です。表面に欠陥のある場合に対する $M_s$ を考えてモデル化する時には、上の方の失われた部分をまず貫通欠陥で考えます。基本としてはFoliasさんが書かれている1970年と1973年の論文に詳しくまとめられている通りです。この考え方は、まず貫通欠陥があった時に、Griffithの説に基づいて径のエネルギーを計算いたします。系のエネルギーを計算して円筒側と平板側をイコールで結ぶ。だから2乗が出てきて $M_t$ はルートがつくのですけれども、これでき裂が不安定化する限界応力を論じています。Foliasの式の左辺

が周応力に係数を掛けたものとなり、右辺が平板側の限界破壊応力ということで、イコールで結ばれるということになります。

右辺の $2\sigma_{flow}/\pi$ が何者かという、 $K_c$  が非常に小さくなっていく場合、要はき裂が進んでいく場合ですね、この数字が $K_c/\sqrt{\pi C}$ に替わります。計算すればわかる通り、 $K_c$ が大きくなるとすぐに Exponential がついているので、右辺が $2\sigma_{flow}/\pi$ となってしまうので、 $2\sigma_{flow}/\pi$ でキャンセルされて、 $\sigma_{flow}$ になります。 $\sigma_{flow}$ は何者ですかという、貫通き裂を持つ健全な円筒の崩壊応力と貫通き裂を持つ円筒の崩壊応力の比ですという形になります。この辺は Kiefner さんが 1973 年の論文で色々示して実験も含めてこれを証明しています。

(P7)7月7日の委員会の時の資料をわかりやすいように作り直したものです。まず先ほどの式、左下にこう書いてあります。左側の方、これが破壊応力になります。破壊応力の線はこの黒い実践になります。Kiefner さんとの実験データをこの緑の丸でプロットしてあります。こういう形になります。ここでこのグラフを見る時に FAD というものがありましてそれは何を考えるのかと言うと、縦軸にこの図のき裂があった時にき裂が長さ方向に進む量を  $K_r$  として、縦軸にプロットする。また、この図のようなき裂があった時に開口して楕円化して広がってくる場合、それを考えた時のパラメータを  $L_r$  として横軸に量をプロットする。そうするとどうなるかって言ったらこんな格好になるのですけれども、我々減肉で考えた時はき裂が横方向に進むのであくまでもこういうふうに広がっていますということを考えます。だから横軸だけの議論にしましょうと。このデータを見ていただくと、 $K_r$  があるところまで下がってきますと、ほとんどこの点は本資料の P26 で示している通り、流動応力でしっかり破壊しておりますので流動応力基準でよろしいでしょうと思っております。ちなみに FAD は API と  $P_s$  はこのような格好になっています。降伏点のところで変わった時に、き裂の動き方が変わってきますので、こんな形になっておりますということでございます。もう一つここでポイントですね。円筒の場合はこの塑性域がき裂の外側に塑性域ができてきます。この塑性域範囲は径が大きくなると長くなり、最終的に平板の場合は無限遠方に行きます。平板の場合は無限遠方の幅に対してのき裂となりますから、実質は 0、傷の効果はありませんという形になっています。

(P8) 以上、時間がないので簡単にですけれども、 $M_t$  と  $M_s$  の考え方をまとめています。先ほどの表面き裂のやつを使って、そこにあの残肉圧があるようなモデルを作って計算いたします。その導出については 45 枚目以降に延々と描いておりますので、後で見てください。これは元々 Maxey さんなり Chell さんなりが導出した式を調べて整理整頓したものでございます。最終的にそうすると  $M_t$  あるいは  $M_s$  というものはどちらにせよ RSF の逆数すなわち健全な部材の崩壊荷重と傷のある部材の崩壊荷重の比率ですというかたちになります。その時にこの  $M_s$  という式の理屈として Chell さんと Maxey さん、日本では間違えて Kiefner さんだと言われているのですけれども、もともと考案したのは Maxey さんですから、Maxey さんのこの式というのがある、この式は傷の底部のところの塑性崩壊域の荷重を考えたもの。Chell さんのは全体の両端も含めた荷重を考えたものというふうになっていますので、我々はこの底部の方の局所崩壊の式を取りましょうというふうになっております。

(P9) それからあと軸方向について考え方でございます。このように軸に対して重心を取ってそれに対しての断面 2 次モーメントを計算しまして、A 点、こっちの一番奥のところと端っこのところの断面 2 次モーメントをこの中心からの距離を計算して、計算いたしますと。Folias さんが軸報告の Mt も作っておりますねそれを使って計算するという形になりまして最終的には周方向の応力と軸方向の応力をミセス応力に計算して、そのミセス応力がある許容値に入ればよろしいでしょうっていうやり方をします。基本は普通の二次応力一時応力の考え方とか RSF=0.9 の適用対象ですけども、先ほど口頭で申し上げた通り高圧ガスの耐震設計のことについては、許容値が降伏強さに持ってきていますので、それ以上超えませんよということで、RSF=0.9 の適用対象外でやらせてくださいというふうに考えております。

(P10) あと第 5 回分科会の議論を踏まえた 3 つの確認事項がありますので、こちらの説明になります。

(P11) Ms の定義、参照応力の定義のところ、p-M 法の側からですね確認事項としてこの前から言われているとおり、半径が大きくなったときはどうなんですかという質問が来ております。これに対して我々の考え方でございます。

(P12) API 法の考え方がどうなっているかというと、減肉部があったら、FEM をやると分かるんですけどその周りが、餅が膨らんだみたいになりますよと。餅が膨らんだみたいになったときに減肉が狭いと、当たり前なんですけど近傍部からの補強効果があって、FEM をやればわかるがこの効果で力を持つてくるので、狭い時に周りで十分補強されます、という形になります。これはその時に外側が突っ張る形となり、張ってきますが、この張ってきたところに先ほど申し上げた塑性域ができてくるわけです。塑性域と突っ張りの出方というのが、半径が大きくなるとあまり出っ張らず平坦になってきますので、塑性域がずっと広がっていくようなイメージで動いていきます。両端の健全部がその部分を担っていきますよという感じになっていく。

(P13) 説明としてまず狭い場合は、先ほどの小山田さんの資料で出していた  $2C=30\text{mm}$  のケースですけども、それは確かに  $M_s=1.03$  で  $RSF=0.968$  ですから、ほとんどこの部分を両端健全部でしっかりと持っていて、強度の低下はないといったかたちになります。同じ半径、内径 2m、肉厚 20mm で計算しているのですけれども、同じ内径と肉厚で長さを 30 から 100 に伸ばしましたって言ったら実はこのところが届きにくくなって、 $RSF=0.752$  くらいまで下がってきます。ちょっと下がってくるわけです。やっぱり強度がかかってくる。これをもっと 4m くらいまで伸ばしてやるとどうなるのですかという、 $RSF=0.2$  となり、 $(t-a)/t$  と等しい、すなわち 20% の肉厚分の強度にしかなりませんという格好になります。なぜかという、結局遠い部分が何も補強されない、単にここの強度だけですといったイメージになってきます。

(P14) それを端的に示したのがこれでございます。縦軸に RSF を、横軸に減肉の軸方向長さを取ってやって、同じ内径で肉厚で計算して設計肉厚の深さでやりますと、長さを増やしていくと、急速に低下していき、補強効果が消えちゃいますよというような格好になりますので、ある減肉のサイズになると単純に残肉圧の分だけの強度になるというような計算になっています。これ自体が最初の全面減肉評価とちょうど連続性をもつような形にもなりますということです。

(P15) 今の話だとちょっと分かりにくいので、全体としてどうなのですかというものが 15 枚目でございます。整理としましては $\lambda$ と呼ばれるシェルパラメーター、こういったことを扱っている人は皆さん知っているとおりのシェルパラメーター $\lambda$ で整理します。これ Folias さんが使っているやつですけれども、1.818 掛ける分母が $\sqrt{D_i t}$ 内径 $\times$ 肉厚、それ分の $C$ 、軸方向減肉分の軸方向長さということになっています。それから $L_m = 1.8\sqrt{D_i t}$ ということで、構造不連続部距離あるいはここに $C$ っていうコンスタントを置いて、ある長さの無次元化したパラメータを持っております。これ何を言っているのかと云ったら、図を見て頂きたいのですが、横軸に減肉の深さ $\alpha$ を取ります。縦軸に RSF を取ります。この $\alpha$ と RSF を考えた時に、あとは $\lambda$ で考えましょうということでこの $\lambda$ が同じなら相似ということで、小さい配管で肉厚が薄いものと大きな配管で肉厚が熱いものでこの $\lambda$ の比率が一緒であれば相似で扱ってよろしいという評価になりますのでそれで見ているわけです。今回この赤色が $\lambda=0.5$ 、実際これは内径が 2m 少々の中古の vessel で、アメリカで 95 年に実験したものです。○印が破裂しなかったところ、×印が破裂したところと。それから水色がこの同じくアメリカで 1.2~1.5m ぐらいの vessel をやったときの破裂試験のデータで、水色が予測線、×印が破裂したところでございます。これを見ていきますとこの $\lambda$ に沿って予測線に対して破裂した箇所あるいは OK だった箇所が上手に合っています。 $\lambda$ ですね、内径が大きくなるとどう動くのですかって $\lambda$ が小さくなって床に張り付いてきますのでこういった動きをするわけでございます。この時には相似形で扱いますって言った時にあくまでも内径と肉厚それから考えてみれば分かる通り、コピーの拡大縮小と同じで、軸方向の長さも拡大、縮小しなきゃいけないで、こっちの方は当然関数に従って伸びていきますから、小さい配管で、ある長さ 1m だったものが大きい配管だったらもっと伸びてくると。具体的に言うと内径 100m ぐらいの原油タンクで計算すると両方に 3m ぐらいずつの健全部が必要になっていきますので、3m と 3m の間の 100mm~200mm の減肉というところほとんど効果がないというようなイメージになってくるかと思えます。それから 20%以下使わないっていうルールは、ここからきてまして、実はこの関数自体が 2 割を切ったところで急速に落ちてくるわけです。急激に落ちてくるところで、実はこの深さのところ非常にセンシティブになってきますので、検査精度とかいろんな問題がかかわってきますので、これが安定的にフラットな範囲に適用範囲を限定しましょうということで、0.8 を評価適用の限界としています。これが我々の根拠でございます。その他にも P26, 27 のあたりの方にたくさんデータが世の中にあります。

(P26, 7) こちらの P26 ですが、これはどうなっているかという、横軸 $\alpha$ 、縦軸 RSF でとっているのですけれども、それぞれのところの $\lambda$ で、三次元のグラフである $\lambda$ で切ったものが P15 のグラフになります。

(P16) それからこれは軸方向のものです。ミセス応力を一次応力に対する許容応力でノルマライズして整理します。流動応力の線の外側に破壊点がありまして、耐震設計用の許容ラインはこの内側になりますので、軸方向の評価方法これで十分安全ではないかと我々は考えております。今回これだけのプロットを取っていますけれども、他に最大 48 インチの径で実験 17 本ぐらい等他にもたくさん論文が数多く出ていてプロットも増やすことはできますけれども、十分これ

で安全であることは確認されております。

(P17) それから局部か全体かということで、これも同じでございます。

(P18) API 法は局部の考え方をやっていますということで、先ほどの説明のとおりで問題ありません。理論と実験の整合性も取れていますということで考えています。また局部崩壊は小林先生らの論文で、これはもともと KHK さんが行った実験のデータですけれども、これに出ているものともちゃんと整合性が取れていますので、問題ないと我々は考えております。

(P19) 温度依存性の考慮ということで、温度依存性で変わってくるんじゃないかということでしたけれども、

(P20) 少し理屈を述べますと、まず特定設備検査規則を見ても降伏強さの 2/3 が常に守られているわけではなくて、いろいろなケースでこれを超える許容応力が認められていて、これが必ずしも必須条件になるわけではありませんよと。それから電中研の報告書においても、だいたい 300 度くらい出ても流動応力は変わらないと。なぜかという降伏応力が下がる分に対して引張り強さの増加がキャンセルされるから、破裂としては変わらないということを行っています。高温試験とさまざまな材料試験の結果がありまして、こんな格好です。

(P21) 316 の実験データを比較すると、三角印が API 法の予測で×印が実際の破壊ポイント、それから右側が C-0.5Mo 鋼の 370°C の試験データです。三角印が API 法の予測で×印が A 破壊試験結果できっちり予測とあっております。健全容器に対しての 10%アンダーはきっちり守られることになるということで、API 法の考え方は非常に正しいというふうに我々は確信をしております。

(P22) それから、塑性崩壊はあくまでも流動応力基準でしょうということで、降伏強さだけでは決まりませんよということで我々は考えています。

世の中の大概のものはほぼ流動応力を降伏というふうに呼んで、全断面降伏=流動応力基準ですよということで考えていますので、我々の考え方というのは、基本は世の中の大きな大勢に従ったもので、おかしいものではないと考えております。

(P23) 以上まとめまして、API 法自体は 3 つの要件、Ms の定義と参照応力の定義、局部崩壊か全体崩壊か、温度依存性の考慮と、3 つ満足していますよと考えております。最後、き裂について石連の三浦部長の方から一言だけお願いいたします。

○オブザーバでございますので、あくまで印象とか感想だけでございます。き裂に関しましては、今回最初の資料 1 のまとめにありましたとおり、論点の整理とかそういったものがほぼ全くなされていないという状況で、今回の減肉の検討の中に入れこむと議論が発散してしまう恐れがあって、またき裂はき裂で深い議論があるかと思っておりますので、現時点の状況ではこのき裂に関して平行で議論するっていうのはちょっと違うのかなという感じもいたします。またき裂自体の現場の事業者の立場と致しましては、き裂が見つかった時点での対応っていうのは、供用運転を行うかどうかという話よりも、まずは溶接補修によって対処するというのが一番でございまして、溶接欠陥によるものが見つかったと致しましてもその時点で装置や機器は止

まっておりますので引き続き溶接欠陥は埋めつぶしていくというような形で対処していくのが最も安全サイドであるというふうに認識しておりますので、ある意味そういうことでき裂に関する供用適性評価につきましては業界、事業者といたしまして、ニーズという点ではさほどでもないのかなというふうに考えておりました。そういう点ではですねこちらは減肉の方の先の供用適性評価についてまずやって頂きたいということが言えるのではないかと思います。あくまでオブザーバの発言でございますので、この件に関しましても委員の方々からご意見あればお示しいただきたいと思っております。

○時間がタイトですが、12時10分頃まで今までいただいた意見、報告について議論をするという時間を設けて頂いておりますので、ぜひ皆さんから色々意見を述べていただければと思います。それではよろしく申し上げます。私の方からも資料2-1に基づいて意見がありますので、皆さんからのご意見をお聞きしたうえでさらに時間がありましたらこちらの方を説明させていただければと思っております。

#### 6. 5 議題（6）議論・質疑

議題3～議題5の説明に対し、以下のとおり意見があった。

○青山学院大学の小川です。小山田さんから説明のあった資料2-2のP10をお願いしたいんですが。P10のところに、APIが合格をすところでの圧力での応力分布というふうにおっしゃって、小山田さんからは、API法が完全に塑性変形しているのではないかという話だったのですが、160N/mm<sup>2</sup>という応力は溝の角のところに沿った応力であって、断面の応力ではありません。力のつり合いの考え方からすれば、右の青の矢印のところが最も重要な検討すべき応力ではないかというふうに思っております。ここの矢印のところが、実際に参照応力が降伏応力にちょうど達した時に、どういうふうな応力分布になっているのかなというのが、私がこの件を検討して最初に気になったところでありました。要するに参照応力=降伏応力という形になった時の小山田さんの資料の青の矢印の位置での応力分布を知りたいなと思いました。そこで、ちょっと石崎さんをお願いして計算をしてもらいました。石崎さんの説明された資料4-1のP32をお願いしたいんですが。傷底部断面応力値比較という資料です。これが先ほどの小山田さんの資料の傷底真ん中のあたりのもので、傷の底が座標の左の端で、傷の断面に沿ったところの応力がそれぞれのプロット点ということになっています。プロット点が、この参照応力がちょうど降伏応力、これは弾完全塑性体の解析ですので、要するに破裂の限界のところということです。各図の左上から右に行くと、だんだん傷が周方向に長くなっている傷ということになります。だから石崎さんの説明でいうと周りが助けてくれなくなる状態というのが右側になります。それから下に行くとはですね、傷が深くなります。10mmの厚さですので8mmっていうのが、石崎さんが、ここがAPIで使用できる限界ですと言われていて、建全部の厚みに対して2割残っているっていう状態になります。それで見るとですね、あのKiefnerの係数で計算した応力分布は、傷と反



対側のところに弾性変形の部分が少し残ってしまっていて、もう少しで全断面降伏するギリギリのところを予測できていますということになります。p-M法のデータも参照応力を計算してもらって、その時の応力分布を示すとこの緑の線になっています。先ほどの小山田さんの説明ではp-M法の計算した参照応力が降伏応力となる所で傷の底が降伏するということになると思うんですが、実はそんな状態ではなく、降伏には達していないってことです。私はこれまでの委員会の中で、p-M法が傷の損傷に対する係数をダブルカウントしていますっていうことを再三申し上げました。この結果は安全側ではありますが、過度に安全側の方向に振れた形になっています。p-M法を基準にしてAPI法を批判する方たちは、力学的には成り立っていません。API法の方が正しく力の状態を評価しているっていうふうに私自身は解釈しています。最初、両論併記ということで事務局の方から話がありましたが、p-M法がダブルカウントしていても必ずしも非安全側にいくことはないので、このMsの件に関しては事務局案のとおりで、もし事業者がそれを選ぶのであれば、それはそれでいいのかなと考えております。以上です。

○小山田様の方から何かありますでしょうか。

○今のところでございますけれど、小川先生のご説明はP10の赤い矢印の位置が問題だということでしょうか。

○小山田さんの資料のこの赤い矢印のところは断面ではなく、見るべきところではないというお話をただけで、それ以上のことは申し上げておりません。

○これ極端な例で、こんな減肉が確かに世の中にあると思えないですが、第5回の分科会の資料1-2のP28の検討が半楕円の欠陥だったということで、このような形で解析したというところでございますけれども、当然欠陥形状を変えればこの位置も変わるということになります。例えばこれをパラボラみたいにしたり矩形にしたとしてもあまり位置が真ん中になつたり、真ん中から全断面降伏するような欠陥形状にもう当然あのモデルを作ってやればいいわけですが、そうするとあの断面積がちょっと増えますので、許容される圧力が少し高くなっていくという方向になるんですが、いずれにしましてもこちらの方で私が申し上げたかったのは、API法で算定されますと、この6枚目のスライドになりますが $111.1\text{N/mm}^2$ と、これ規格のユーザーは $111.1\text{N/mm}^2$ ということ計算するわけでございます。実際には小川先生が言われるとおり、この斜めのコーナー角部の下の所でどうなのかっていうのはあるかもしれませんが、その他のところも $111.1\text{N/mm}^2$ よりは大きな応力になっているということは確かなんじゃないかということがこちらから示されているのではないかとございまして。この欠陥形状が伸ばした300mmの状態になりますと、この真ん中中央部からこの300mmの場合ですと、先ほどのようなコーナーが先に行くのではなくて真ん中から最初に全断面降伏、ある意味きれいに全断面降伏してですね。この場合にもやはりユーザーの手元にはあの情報として入ってくる応力値は $111.1\text{N/mm}^2$

ということになります。2.1MPaで111.1N/mm<sup>2</sup>、ちょっとこれ全断面降伏してしまっているのに圧力を合わせられないのですが、FEM解析ですともっと低い圧力で全断面降伏に達しているということが示されていて、これが減肉部の中央部にいっていますので、コーナー部云々という話ではなくて、やはりその応力値が小さく出てしまうというのは事実なんではないかということとを指摘しております。

○すみません。小山田さんの発言は私の言いたかった主旨と違いますので。私がこの図で言いたいの、周方向の力のつり合いでものを考えているところなので、コーナーではなくて青の矢印で示された部分の応力分布を見るべきだということです。この応力分布をいろんな形状に対して計算したのが石崎さんの資料のP32ですということで、今の小山田さんのコメントは私の主旨とは違います。以上です。

○ちょっとコメントさせてもらいますと、小山田様の事例②では、実験結果とFEM結果とp-M法、API法で比較しています。そこではAPI法の方が低く実験結果とも合わないが出ています。それからGregの論文でもAPI法では参照応力は小さく見積もることを論文で出しています。そういうことを考えるとやっぱりAPI法での参照応力は、全て過小評価しているというふうに判断されるのではないのでしょうか。

○すみません。今のお話ですが、この資料について私は話をするつもりではなかったんですが、API法は $M_s^{Chell}$ を使っているんじゃないかと思うんですがいかがですか。先ほどの石崎さんからの説明によると、Kiefnerを使ってやりたいという話で、私が説明した応力分布もKiefnerの $M_s$ を使って降伏ギリギリのところが出ていますねっていう検証ができたということをお話したということです。鴻巣先生から実験と合わないっていう話がありましたが、石崎さんからいろいろご提供頂いた資料を私が見る限り、API法は破壊をある程度正確に予測してそれに基づいて裕度を考えて使えるとか使えないかを判断していて、その部分には間違いはないというふうに私自身は思っています。

○今小川先生からご質問がありましたが、API法の $M_s$ はすべてKiefnerの $M_s$ を使っております。

○ $M_s^{Chell}$ をAPI法の式に使うと、現実的でないひどい結果になるので、Kiefnerの $M_s$ を使っているということです。

○最初の111.1N/mm<sup>2</sup>はKiefnerで計算しているということですか。わかりました。

○次に、API法では、破裂を推定でき、それに対して裕度を考えて評価するというストーリーだ

と思います。ところが欠陥前方のリガメントが全断面降伏するかどうかというのは、その破裂条件にどの程度の裕度を考えればいいのかが分からないと思います。やっぱり最初に基準として何を捉えるかという、破裂ではなくて、欠陥前方でのリガメントが全断面降伏するかどうかを基準として考えるべきだと思います。

○弾完全塑性体で考えた場合は、断面の全断面降伏と破裂は等しいと思います。

○それはそうなのですが。あとでその辺も議論しますけれども。

○これは重要な点なのですが、石崎さんに検討してもらったのは弾完全塑性体なので、全断面降伏＝破裂です。破裂を正確に予測しているという説明の仕方をしましたけど、それは全断面降伏と同じことです。

○ちょっと先走ってしまいますが資料 2-1 の P13 の図 H. 5. 3 という図を見ていただきたいです。通常我々が今 FFS で扱おうとしているのはセラミックスみたいな材料ではなくて、こういう応力ひずみ関係の材料を扱おうとしているわけです。いま我々が扱っているのは OPB という材料だと思います。規格ですのでいろんな材料が対象となり、その場合で降伏応力がだらだらとなる場合は OPB ですけど、こういう材料に対して破裂を捉えて、これを弾完全塑性体として扱うということは OGB で考える事になります。ですので、この OPB の応力-ひずみ関係を OGB のような線で考えるのは適切でないと思います。

○すみません。先ほどの石崎さんの説明は、流動応力でこれを求めるということで、私自身は OFC という曲線と理解しています。

○OFC で考えたとしても OPB のものを OFC で置き換えるっていうのは見てわかるように非常に違いがありますよね。

○それは図の書き方です。この横軸はとても破壊がここでは起きないような図の書き方になっています。通常ですね、破断時には数十パーセント伸びるんですよ。多分この辺は石崎さんにお答えいただいた方がいいと思うんですけど。降伏伸びは多くても 2% ぐらいの領域で、その先にかかなり大きな範囲で加工硬化していく領域があります。この図は降伏伸びの量を強調しすぎている図だと私は理解しています。

○立ち上がって行くのはもっと大きく立ち上がるということをおっしゃっているのでしょうか。

○降伏伸びの比が相対的に小さいと言っています。

○仮にそうおっしゃても OPB である曲線を OFC で評価するのはちょっと無理があると思います。

○多分、いろいろな規格がもうそういう形であり、色々な場合に合うという形になっていると思うので、この辺は石崎さんからご解説いただいた方が良いでしょうか。

○私の方の資料の 4-3 を見ていただいた方が良いでしょうかと思いますが、資料 4-3 の Fig. 1、でこれが一応 Sec VIII の Dev. 2 というところがあって、その part. 5 っていうところに FEM の弾塑性解析を用いた評価方法というのが基準として決まっております、これは委員の皆さんよくよくご存知かと思いますが。その中の Annex3D のなかで弾塑性解析をやる場合の弾塑性曲線の作り方ということで、Ramber g-Osgood 則を基に約 25%低くしたカーブの作り方が規定されています。粗々でいえばそういうことです。25%天井塑性域を下げたようなカーブになっていますが、とりあえず手持ちにあるものはこれなんですけれども、これ見ていただくと最初のところまっすぐ行って曲がってくるとこの降伏点があって、先ほど小川先生がおっしゃっている通りそんなに大きくあるわけではなく、その後なだらかな曲線となります。横軸は歪みです。伸びていくと真応力、真ひずみの曲線がこうなります。点線が公称応力、公称ひずみですが、こういう形になってきます。平坦に近づいたところで頭打ちで塑性域が、これだと  $3.0 \times 10^{-1}$  ぐらいのところ破断しているということになっています。というところまで破壊が起こりますよと。弾完全塑性は、一番天井のところとその 200 から 250 の間、200 ちょっと位のところで曲がっているところとのアベレージでとって四角くやっていますから、それで言ったら別にあの。

○ちょっとよろしいでしょうか。この曲線はですね、今 FFS が対象としているのはいろいろな材料があります。今出されている図で説明されてもピンとこないですね。色んな材料があるので、さっきのように降伏点がだらだらとするような場合ももちろんあるわけです。それは BS でも API でもそういうケースを考えています。例えば私の方の 12 ページの図 H. 5.1 を見ていただければ分かると思いますが、これは BS で示しているように降伏点がだらだらいく材料も世の中にはあるわけですから、そういうことも考えて評価に入れるべきだと思います。先ほどのような図が全てを代表しているというふうにおっしゃるのは、ちょっと今対象としている材料はそういう材料ばかりじゃないものですから、ちょっと説明が不十分かと思いますが。

○よろしいですか。他人の発言を割り込まないということでしたのですが、鴻巣先生のことに対して反論を一つ言いたいのは、これを読んだときによく思ったのは、鴻巣先生は降伏点の話はなさるんですが、それは先ほどの FAD の縦軸の話なんです。縦軸の部分の不安定化のところは、J 積分の不安定化ということで BS にしても API にしてもその変曲点を決めていきますよということが書いております。横軸の塑性崩壊の軸に関しては、そこは関係ありません。その縦軸の部分関係なければ BS の方でも PS7910 でも同じですけれども、その Kr の方が、軸が関

係ない時は横軸だけでみてくださいよ、その時は $\sigma_{flow}$ ですよということがはっきり書いています。小林先生の書かれた供用適性評価ハンドブックにもそのこのところの縦軸のところは確かにあの降伏点において、J積分の問題で変わりますよということが書いてます。BSを見てもそうですし、FADを解説しているAndersonが書いたFRACTURE MECHANICSという教科書にもそこははっきり書いています。我々の理解は、それはあくまでも縦軸ですよ、と。塑性崩壊の話は降伏点の話云々は関係なく、単に破断値までのエネルギーでございましょうと。エネルギーで積分しているんだったら別に弾完全塑性体でやられても同じような数字、ほぼほぼ一緒じゃないですかと。その部分が $\sigma_y + \sigma_f$ のアベレージに1.1倍を掛けるというやり方もあるし、若干議論はあるにしても、一番コンサバ側で $\sigma_y$ と $\sigma_{ult}$ のアベレージでということをやるとするのが一般的で、安全側でやるというのが一般的に安全側でやっているというだけの話だと理解しています。以上です。

○FAD曲線の横軸の話であれば、BSにしるAPIにしる、図H.5.1のように先ほど出したのだらと降伏する材料の場合は横軸の $L_r$ を1にしなさいとなっています。すなわち弾完全塑性体で言えば降伏応力で、図H.5.3のOPBでやりなさいというふうになっています。

○すみません。それはき裂の評価の話で、き裂の進展がかかわってこないときは横軸を $\sigma_{flow}$ までやっていいですよというのはBSの7910の10.3に書いていたと思いますし、AnnexのGかHにも減肉評価のところと同じように書いていますので、我々の理解はそちらの方です。

○ちょっと極論に入っていますが、皆さんに理解してもらいたい点があって、もう少し大局的に話して、今のお話もちょっと出てきますけども。まずは何が違うかということ、先ほどちょっと議論がありましたけれども、塑性崩壊という言葉の定義ですね。塑性崩壊の定義では破裂を考えるのかそれとも全断面降伏を考えるかという問題があります。これについては例えば私の資料でいますと22ページの図H.9.3のところに、鶴戸口先生が書かれたですね塑性崩壊、崩壊荷重と書いていますね、崩壊荷重をどう評価するかと言ったらこの極限設計理論の下限定理っていうのが今盛んに言っているリミットロードアナリシスのことです。それに規格の表に記載の降伏強さ。これは規定最小降伏強さのことですね。降伏強さを基に計算された崩壊荷重。崩壊荷重と書いていますけど、これはやっぱり全断面降伏を考えています。そういうリミットロードアナリシスの考え方で現在は欠陥がない場合に対して構造設計規格に基づいて設計がされています。ですから、き裂の問題に特有というご指摘だったのですが、減肉欠陥もき裂もリミットロードアナリシスでは違いはないので、それは違いますが言うことです。それから塑性崩壊を破裂と考えると、この全断面降伏に至るまでどのくらいの裕度を考えたらいいかを知ることは、難しいということを行っています。それから、フローストレスというふうに盛んにおっしゃっていますが、例えばWES2820の解説では4-1-2や4-2-2では破裂と言っています。それから石崎さんのスライドの15の説明でも破裂って言っています。すなわち破裂のことを議論しています。ですから

この減肉欠陥前方のリガメントにおける全断面降伏の議論はしていません。減肉欠陥前方のリガメントで全断面降伏していて問題ないのかと言うと、いろいろ問題があると思います。そこに塑性域が存在すると、今後、その欠陥を放置して継続して使っていくうえでいろんな問題が出てくると思います。それを避けるために安全裕度として1.5で割って、塑性域があまり出ないような状態で使うというのが今の設計の考え方だと思います。例えば私の資料のP14の図H.5.4というのがありますけれども、これはNACEで決める材料選定基準です。我々が装置の構成材料を考えると、流体環境を見て材料を決めるためのデータです。この温度、この流体組成だったらこの材料で大丈夫ですという話ですが。これは全部、塑性変形が予めあることは考えていません。ですから、装置はいろいろな条件で使われていますので、減肉欠陥の前にはかなりの塑性域があると、このデータサーベイの値とは全く違う状況が生まれてくると考えられます。もう少し具体的に言うと、アミンの応力腐食割れみたいなものは、溶接すると塑性域ができて残留応力ができるので、後熱処理しなければならないというふうにアディショナルで決めているわけですね。そういう塑性変形状態を避けるために欠陥の前方のところは弾性域であってほしいということを行っているわけです。そのときにどう考えるかと言うと、全断面降伏するときに対し安全裕度を考えて、1.5というのは一応構造設計規格ではそうになっていますが、FFSではもう少し安全裕度を上げて、例えば2.0にしてもいいと思います。ただ最低限1.5は守るべきであるということをご主張しているわけです。まずこれが塑性崩壊の定義の一つで問題点の一つです。2つ目はですね、MtとMsの定義がどうも違うんじゃないですかということですね。Msの定義は、例えば図のH10.2ですね。

○申し訳ないけれどね、話を違うことにしないで今の非常に重要なところを。

○何か反論がありましたらどうぞ。

○オブザーバですけど発言よろしいですか。

○どうぞ

○高度化検討分科会するときにも申し上げたんですけどね、今の議論、鴻巣さんは全く検討違いなことをおっしゃっていると思う。これ全部読ませていただいたけれどね、今の全断面降伏、塑性崩壊、破裂ね。そういう区別だとか現象というのを正しく理解していない議論をずっとしている。間違いを言っていただくと、これは鵜戸口先生の名誉の問題だからね。今の資料のP22、なんでこんな資料を出してくるかがさっぱりわからないんだけど、これは健全な容器の塑性崩壊の話ね。それで、鴻巣さんはさ、極限設計理論の下限定理というのをご存じですか。何ですか。下限定理っていうのは。

○我々が言っているリミットロードアナリシスです。

○下限ってなんですかって聞いている。

○降伏応力でやっている場合です。

○違います。全断面降伏の解析をしたら構成方程式が必要である。その構成方程式はこの時代は弾完全塑性体しかなかった。弾完全塑性体という構成方程式で塑性崩壊の解析をしたら解がいくつが出てくるわけ。それが下限上限という話でね。鴻巣さんはその話を知らないから、そもそも出発点から間違っていたわけ。ここでいう下限とは何かというと、局部崩壊。局部崩壊のあと全体崩壊が出てくる。この時代から、下限と上限という、塑性崩壊したらいろいろな区別ができますというのがわかっていて、下限というのはだから局部崩壊のことを言っている。ご理解いただけましたか。

○いや。

○それで、API との議論で、下限を取るか上限を取るか、要するに局部を取るか全体を取るかという話になるわけ。それが一つね。それはどうでもいいんだけどね。それで、出発点で歴史的に、弾完全塑性体という構成方程式を非常に簡便にしない限り、塑性崩壊、全断面降伏が全部同じ。円筒が塑性崩壊したら当然破裂するわけ。解析では破裂なんて出てこない。全断面降伏、塑性崩壊ということしか解析では出てこない。弾完全塑性体という構成方程式で、塑性崩壊、全断面降伏の円筒の式っていうのははるか昔に出来上がっていて、それがナダイの式という式になったと。それが歴史的だんだん進歩してきて、ひずみ硬化、加工硬化を考慮しなければだめですねという話になって、有限要素法で解析するという時代になって、ところがそれが非常に厄介なわけ。全ひずみ理論かひずみ増分理論かっていう話になって。それで有限要素法で計算してもみんな計算結果が違いますねって。それで解が収束しませんねって話になって。それでどういうことになったかということ、ひずみ硬化塑性体を、有効降伏強度、ここで皆さんが言っている流動応力ってやつです、それで近似したらひずみ硬化塑性体で厳密に解析したものとほとんど同じですねという結論になったわけです。現在あらゆる設計コード、設計規格とか維持規格というのが、全部流動応力ベースでやりましょうと、J積分も全部流動応力でやっている。それから石連石化協も勉強が足りなくて嫌なんだけど、ここの資料で流動応力を使っていますというのはね、我が KHK が世界に誇る KHKS0220 という超高压の基準を持っているわけ。それはもとは ASME 規格の Sec8 の Dev. 3 なんです。Sec8 の Dev. 3 は、要するにクライテリオンとして、弾完全塑性体の塑性崩壊の式を使っているわけよ。ご存じでしょ、当然。それを、それはだめですと KHK がダメ押しをして、KHKS は流動応力を採用したわけ。その後の話があって、それで Code コミッティーにもって行って、KHK はこうしましたよ、ASME も変えたらどうですかって言ったら、すんなり

変えて、今 Dev.3 は流動応力を採用している。それが石崎さんの説明で、弾塑性解析をしたら 2 軸、3 軸を考慮しなければいけないわけ。ですからトレスカにしますかミーゼスにしますかというのも非常に大きな問題で、ASME はトレスカだったわけです。KHKS はミーゼスを採用しているわけ。それもごく最近ね、ASME は Dev.3 を、要するに流動応力を採用して、それからミーゼスにしたわけ。だからある意味こういう弾塑性解析の問題は、日本が ASME をリードしている。そういう状況を全く理解しなくて、鴻巣さんとはとにかく古い時代の応力ひずみ曲線を降伏応力だけの弾完全塑性体で近似しますということにこだわり過ぎている。それに対して 1.5 という安全係数を見るから、それは何を言っているかということと弾性設計の保証をしているだけなんです。それはもう時代遅れです。ものすごく簡単に言えば。

それはもう議論の余地なしにしてほしい。それが今一つの問題。そうすると多分高温でね、降伏点がものすごく下がるような非常に嫌なケースを持ち出してね、ぎりぎりになるとかそういう議論をしている。それは当然そういうことが出てくる。要するに設計規格は引っ張り強さと降伏点を両方見て低い方を採用している。安全係数掛けるけど。だからそんな細かいところを議論してもほとんどしょうがない。弾性設計じゃなくていいわけ。要するに塑性崩壊という基準を決めて、そこに対して安全係数を見ているという問題。あまりにつまらない議論がずっと続いているので、申し訳ないけれどこれだけ言わせてもらいます。以上です。

○よろしいでしょうか。先ほどから私が申し上げているのは、破裂を基準にして、欠陥前面の残余領域が、全断面降伏していたとしても許容するかどうかということが問題で、こちらの考えではそれは許容できません。全断面降伏するのに対して 1.5 の安全裕度を取って、なるべく弾性域に止めたいという。こういう趣旨です。それはおかしくないですよ。ですからそういう趣旨で FFS はやるべき。

○趣旨は分かりましたけど時代遅れだと言っているだけです。

○いやそうじゃなくて、例えば資料 2-1 14 ページの図 H.5.4 を見て頂けますか。今対象としている機器はいろんな材料があっいろいろなプロセス流体があるわけです。そうするとですね、それに対して降伏した状態でないように今の構造設計はされているわけです。降伏応力に対して 1.5 の安全裕度を取っているのは、なるべく弾性域内で使って欲しいということです。そういうものに対しては、このような NACE のコロージョンデータベースでもって、こういう使われ方だったらこういう材料でいいですと言って材料選定をしています。ですからこれを降伏した状態で使えるかと言うと、私は必ずしもそうではないと思います。だからそれは例えばさっき言ったように、追加としてアミンの応力腐食割れなんかは PWHT をやるように言ってきているわけです。追加としてあるわけです。それはそういうことを避けるためにやっているわけです。ですからあの時代遅れとか、遅れじゃないということよりも、その基本的にはですね、今の構造設計がなるべく弾性域の中で使っていきましようというのを、欠陥があったら塑性域があっても構わない



というふうに判断されるならそれはいろいろ問題が出てくると思います。一時的な使用にはそういうことでもいいのかもしれませんが、FFS規格は継続的に使用を認めようとする点から、私としてはやっぱりこの14ページ図H.5.4のようなかたちで材料選定がされていますので、継続使用の場合には問題が生じてくるというふうに思います。塑性域のままでいるとその後地震が来た時は変形が当然起こりやすくなるわけです。だからフローストレスでやったことについては、私はこの超高圧ガス設備基準KHS0220を作った時に携わっていたのでよく知っていますが、この今、FFS規格で考えている材料とは違って、ごく限られた材料なんです。だからその超高圧ガス設備で使う材料ですので、そういう限られたところではそういうことがあると思うんですけど、今我々が対象としているのは色々な材料があります。そういうところで全く問題なく使うためにはやっぱりそういう抑えはしておいた方がいいというふうに私としては考えています。そしたらですね次にですね今。

○よろしいですか。今のアミンの応力腐食割れの話で発言させて頂きたい。一応、実際使っている立場として、これは石連石化どこのユーザーも一緒だと思いますけれども、アミンの応力腐食割れなり環境割れのところ、SCGがあるところについては当たり前ですけども、WES2820のところいき裂のあるものには使えませんとあるものですから、我々はこれを使う意図はありません。そもそもそれからアミンの応力腐食割れのPWHTの話は皆さん各社で責任をもってやられる話なので、その中でいき裂がどうこうという話には該当しないと思いますので、今のこの話は今回の鈴木理事と越野理事がお作りいただいた結論をひっくり返す話ではないと思っています。またいき裂の評価って話になりますと、確かにその話ありますけども、APIのパート9の方は環境割れの環境では使いませんよというふうにはっきり書いておられますのでそういうことだと思っています。以上です。

○今のご説明だとき裂の話ですね、私が言っているのは減肉欠陥の前方に塑性域があった状態で使って構わないということになった時に、いろんな問題が出てくるということを指摘しているのであって、いき裂の問題は関係なく、先ほどの話とは全然関係ないです。よろしいでしょうか。そしたらですね、先ほどは塑性崩壊の定義について破裂なのか全断面降伏、いき裂前方での全断面降伏なのかどうかという話でした。それからもう一つはですねMt、Msの定義です。Mtの定義はですね、非常にキーなんですけど、石崎さんのPVPの論文の定義とですね今回では違いますし、その今回の資料ですとFoliasの定義とも違います。その辺は何かあのコロコロ変わっています。このMsについては、P24のH.10.2のところに書いてありますけども、Foliasが弾性解析で出したもので、MtっていうのはH.10.2にあるような式です。この弾性解析で出したMtに塑性破壊とかそういうものが入ってくることはあり得ないわけです。ですからまずその定義がおかしいと思います。次の資料2-1図H.10.3を見ていただけますか。Mtの定義を皆さんちょっと誤解されているんじゃないかと思いますが、円筒に働く応力と平板に働く応力は同じなんです。同じ応力が働いているけれど円筒に対してはバルジング効果があるので、それをどう考えるかっていう

ことで Folias が  $M_t$  を考えています。これは弾性解析ですね。円筒で解析するのは大変なので、もし平板で解析例があったらその応力に対して  $M_t$  倍の応力で置き換えればいいということを言っているわけです。例えば、それをやっているのが P29 のダグデールの解で盛んに石崎さんが出している。H. 10.1 というのがダグデールの式の解です。これは平板に対する解です。これを円筒にするにはどうするかっていうことで、Folias はダグデールの式の  $\sigma$  の代わりに  $M_t \sigma$  を掛けています。このようにすれば円筒でのダグデールの解になるということを、論文で出しています。ですから、 $M_s$  と  $M_t$  がそうなんですけれども、 $M_s$  についても同じようにキーなところがあります。私だけ発言するのもどうかと思いますので、委員の方でもしご意見があったらお願いします。

○その  $M_t$  と  $M_s$  の話なんですけれども、私も Folias の論文を読ませていただきましたけれども、石崎さんが言っているような定義ではない。しかも API にはちゃんとバルジングファクターと書いてあるわけですね。石崎さんの資料 4-1 の P5 にこの式が、さきほど鴻巣先生がおっしゃったように、石崎さんの講演論文の PVP2020 の定義とも違うんですけれども。私が非常に危険に感じるのは、例えば  $M_t$  っていうのは最初に Folias が円筒の中の応力拡大係数についていったわけですね。 $M_t$  っていうのはスルーシクネス・クラック（貫通き裂）に対する修正係数、それを  $M_s$  っていうパートスルー・クラック（非貫通き裂）に対する修正係数に拡張適用した、言ってみれば近似適用したわけですね。だから近似の近似の、修正係数なんです。それがですね、P5 の式の右辺に書いてあるような、減肉容器の限界圧力と、健全容器の限界圧力の比であらわされるといことは、右辺についてはかなり材料や温度によって変化するが、左側は幾何学的なものなんです。幾何学的にしか変わらない。ということは関数関係が全然違うんです。したがって右辺と左辺が全然違うものを定義として使っている。結局先ほども言いましたように、近似の近似の修正係数をですね、おかしいことに材料強度学的に考えられないわけですよ。強度のクライテリオンに持ってくるなんてのは絶対に考えられない。そういうことを平気でやっているのは非常に問題がある。それとさきほどのフローストレスについて言及しますと、急に出てきたんですよ。フローストレスについては。私は分科会の方もやっていますけれども、分科会の方では一度も出てこなかったんじゃないかな。それで急に出てきたんですね。フローストレスもですね、言ってみれば下降伏点、これで抑えるというのは API にもちゃんとストレスーストレインカーブが載っているように、やはり安全側のところなんです。それに対して、加工硬化が激しいような低合金鋼についてはフローストレスでもいいでしょうということなんで、ちょっと小林先生さきほど失礼だと思ったんですけれども、議論がくだらないとかですね、そういうことはこの場ではおっしゃらない方がいいかと思いますが。そういうフローストレスというのが急に出てきて、特に私としてはですね、フローストレスを選ぶか下降伏点を選ぶかというのは論理的にはそんなに違いはないような気はするんですけれどもね。取扱いの問題です。それで扱っている材料が違いますから、古いとか新しいとかいうわけじゃなくて、炭素鋼で、軟鋼のような構造用炭素鋼ですね、下降伏点を示すようなものについては  $\sigma_y$  で語るべきだと思います。それからちょっと石崎さんの話は色々ところどころ変わりますし論理的におかしいところがある。そう思い

ます。

○川崎重工島川です。本日冒頭に短期で答えを出さないといけないという話がありまして、今日の議論を聞いているとこの5年間の議論とほとんど変わらないという気がしています。規格というものがどうあるかというべきかという、右辺と左辺のバランスをどうとっていくかの議論であって、右辺がどうだ左辺がどうだ、だけの議論をしてもいつまでも結論が出ないと。右辺と左辺のバランスの議論の中で、右辺と左辺をどういう事象に対して抑えるかというところで、たぶん最初の越野さんの説明では、API法とp-M法で違いがあった、そこはどうか抑えたいかというのは、当初の提案のようにユーザーが判断するべきであって、手法としては両方用意してあげていいと思うんですね。鴻巣先生が言われているAPI法は非常に危険だということなんですけれど、ちょうどホッパー線図出していただきましたけど、このホッパー線図で左だけ切り取って出していますけど、右側の二次応力という概念を出してこないといけない。すなわちあの石崎さん言われたように周りの拘束を考えると内圧であってもこれ一次応力ではなくて二次応力に近い状態で押さえるべきもの。二次応力になるともう塑性まで許しているというのは、現状のASMEでも許していますので、やっぱり規格のバランスから行くとあの今のAPI法のやり方は決して危険なことではない。そのどういうクライテリアを選ぶかはやっぱりユーザーに判断を委ねるというのが現状としては最適の方法じゃないかなというふうに思います。以上です。

○島川さんがですね、ユーザーの責任、これはいいです。ユーザーの責任の方が。私たちはこれを作ったとしてもとてもじゃないけれど責任を負いきれない。ただし、質問ですけども、ユーザーって失礼ですがそんなに事前の知識を持ち合わせていますか。いろいろな判断ができるね。例えばAPIではKiefnerとChellどちらを選んでも構わないよと。そうしたときにきちっとした合理的な判断でどちらかを選べますか。その上に今度はAPIとp-M法ということになると、選択肢が多くなるわけですよ。その中できちっとした判断をユーザーがすることはできますか。私はできないと思うので。きちっと規格で規定することが必要なんです。しかも規格は少なくとも合理的なものでなくてはいけません。先ほど申し上げた通り、材料強度学的あるいは材料力学的に首を傾げるようなものであれば非常にまずい。そういうふうな判断をしてください。ユーザーはそんなに事前知識がありません。

○今中曽根先生が言われたように、細かいところまではユーザーは理解していないという上で規格は作るべきだというふうに思います。ただし、このクライテリアは何をされているんだということだけは明確にやっぱりユーザーに認識させないといけない。p-M法というのは減肉底の塑性崩壊を押さえているんだ。API法は、破裂という言葉はあまり好きじゃないんですけど、構造体としての崩壊を防いでいると。そういうところは明確に言った上で二つの選択肢。今コロナで行きますとp-M法はゼロコロナでAPI法はウィズコロナというような感じの運用だと思うんです。

○ちょっと気になった点はですね、先ほどちょっと申し上げる途中だったんですが、Mt、Ms の定義がちょっと間違っていると思います。その影響はどういうところに出るのかということですが、それは例えば私の資料の P17 の図 H.7.2 を見ていただきたいんですが、これ見ていただくと分かるんですが、これ Kiefner の式を使った API 法の参照応力を示しています。Chell の式を使った p-M 法の参照応力もありますが、(a) (b) (c) と径が大きくなるとどういふふうに変化するかということをも式をただそのままエクセルで書いたものです。ですから通常これらの式が認められればこういうことで評価されるということ。その時に大径になったら、p-M 法の参照応力は平板の参照応力と同じになる。これは理屈から言って当たり前です。ところが大径になると、API の参照応力は、膜応力と同じで欠陥が無くてもあっても、ないのと同じですという評価になっています。これは実際に使う上で問題があるんじゃないかと私は思います。だから例えば次の図 H.7.4 を見ていただくとですね、極端なことを言うと、容器が噴破して破裂しているような時でもこれは安全だと評価されるということになります。大径だからといってもそんなことはあり得ないと思います。だからこのような評価となるのは何と云っても Ms の定義の違いから来ている。それからもう一つは参照応力を出すときにですね、私は循環論法って言って、Kiefner の式では欠陥があるところの力学的なつり合いから欠陥減少の式を出していますが、それを平板に対するリミットロードアナリシスですから、応力との力のつり合いからでている式に代入しています。別なところで力のつり合いを出したのを別な方の力のつり合いの式に代入して展開しています。このようなところから今のような、極端なことを言えば弊害が出てきます。温度の影響についてもですね、材料特性が入ってなくて幾何学的特性しか入っていないので、そういう面で問題が出てくるということを指摘しています。

○よろしいですか。議論が白熱していたのでちょっと入るのを遠慮しましたけれども。まず鴻巣さんがおっしゃった Mt のお話ですけども、こちらの資料の 33 枚目に①②③ということで、Folias さんの論文のどこにどういう導出が書いてあるんですかということと全部引用しておきました。本日ここで全部説明すると皆さん吸収しきれないと思いますので、彼わかりやすく書いてくれていますからよく読んでいただきたいと思います。ポイントは鴻巣さんは単に平板と円筒の端部の比率を Mt で置いただけだと言っておりますけれども、そうじゃなくてこの Folias さんの式をちゃんと読んでいくと、グリフィスのエネルギーで解いていますから、貫通き裂を持つ円筒の崩壊エネルギーと貫通き裂を持つ平板の崩壊エネルギーをイコールとして行っています。すなわち高校の物理でやっている通り弾性エネルギー 2 乗ですから 2 乗と 2 乗のイコールになっているから Mt の所にルートがついていますというのが読み取れます。しっかりと読んでいただければと思います。それからもう一つはですね Ms の定義のお話でございます。Ms の定義については去年の 9 月 29 日も散々お話しした通り、私どもの資料 4-1 の 43 枚目並びに 44 枚目の所に、これまた持ち帰ってよくよく眺めて頂きたいんですけども、Kiefner 並びに Chell の論文それぞれの Ms をちゃんとこれでこうですよというふうに書いているところがあります。そのところではちゃんと荷重と荷重の比、Kiefner も Chell も同じことを書いています。Kiefner のこの

式はどこから出てきたんですかって言うと、67年のMaxeyが導いた式ということでございます。日本の国内の中で Kiefner の式を実験式と呼びますが、それもともとはえ empirical ということで、Chell が書いたんですが、この empirical というのは理論を実験で証明したという意味でございます。それともう一つはですね、Ms の話ですけれども、一つはずっと我々としてずっと今回の議論で言っているんですか、平板と円筒の比率であると言うのであれば、我々の資料4-1の42枚目のような形で何らかの平板の計算式と円筒の計算式があって、その比率が出てくればわかるんですけども、例えばこれ一つの例としてですけれども、Sattari-Far という方がリミットロードアナリシスということで塑性崩壊をターゲットに FEM で解いています。塑性崩壊です。き裂の三軸構造は考えておりません。その状態で解いた時の状態で見ると、一応平板と円筒を同じ形状で彼が解いていますから、その形状で解いてやりますと、平板と円筒の関係とやるとこのバツテンのようになって話が噛み合わなくなってしまいます。一方 Kiefner で行ったような形でやりますと、緑の丸と。一方で Kiefner の式が緑色の線、それから Chell の式は赤色の線というふうになっていますので、ちょっと噛み合わないじゃないですかと。どうしてこういうところが出てこないですかと延々と、悶々と我々が思っているところでありますけれども。とは言いながら、この辺を見ていただければ本日冒頭に鈴木理事並びに越野理事が出して頂いた結論をひっくり返すような議論っていうのは今なかったのではないかというふうに私は思っております。オブザーバですが以上です。

○今の石崎さんのお話ではですね、非常にごちゃごちゃしていると思うのは、今減肉の話をしているわけですね、ところが Mt とか Ms というのはおっしゃったようにき裂に対してやっているんですよ。そしたら減肉に適用したというのはやっぱり近似ですよ。先ほどから。ですから近似的に適用しているはずであってね、それを厳密な破壊のクライテリオンに持ってきちゃいけないんですよ。それともう一つ、鴻巣先生の資料 P55 をご覧になると、まさにこの式は途中段階で出てきたものであって、例えば応力集中係数、これを皆さんクライテリオンだと、強度を決めるクライテリオンだとは誰も思いませんね。ところが、こういうふうに例えば円孔があっただけで脆性破壊をしたと考えると。材料力学の問題でよく出すわけですけれども、 $\sigma_c$  で壊れますといった時にですね、ちょうど先ほど石崎さんが出したような定義式が出るんですよ。それは先ほど島川さんが右辺とか左辺とかいうもんじゃないと言いましたけどこれは非常に大事でして、今の応力集中係数で言えばお分かりになるかと思えますけれども、左辺は応力集中係数だとすると、これは幾何学的な問題です。ところが右辺は材料強度に関係する量で、材質、温度で変わるということになって、関数関係が成り立たない。今応力が3倍、例えば円筒で言えば周辺の応力よりも高くなりますよと、その応力が  $\sigma_c$  に達したら壊れますというふうに考えて破断時の負荷応力を計算してみてくださいって言った時に、これは成り立つんですけども、その応力集中係数がイコール材料の強度を決定するというと、全くおかしい話になるのです。健全な材料の強度分の円孔のある材料の強度。これを誰しもクライテリオンだなんて考えないわけですよ。だからそういう定義はおかしいのです。それと非常に石崎さんの場合は FAD でもなんでも、あるいはダ

グデールのモデルでも、ダグデールのモデルは二次元のき裂について言っているわけですよ。それを混同しちゃって、あるところではき裂のことを言っていて、あるところでは私たちは減肉の話をしているんだと、という話をしているんでね、非常に議論が混乱しているんですよ。それを含めて、私たちが出した質問に対してずっときちっとした答えがなしにずっと来ちゃったんでね、長引いているんですよ。非常に私としては個人的には困っていることなんですよ。

○よろしいですか。私の方から一言言わせてください。FADの混乱したのは中曽根さんの方だと思っております。なぜかと言うとこの $K_r$ と $L_r$ 、先ほど申し上げたとおり、三軸拘束が解けた段階での $K_r$ の軸が下がってしまえば $L_r$ だけの問題ですよということで、その場合は開口き裂のところが楕円化しますから、応力集中係数関係ないでしょというだけの話でございます。そのところが理解できないままここにきているだけの話なので、私としてはこれは特に中曽根さんの今の意見が今回の結論をひっくり返すというような話ではないというふうを受け止めています。以上です。

○鴻巣さんと中曽根さんがずーっとおっしゃっているのは、その式の減肉容器と健全容器の破裂圧力、塑性崩壊圧力の比。これは形状で決まる定数でしょうと。それを材料強度の判定基準に使うのはおかしいっておっしゃっている。そこが全てだと思う。それがAPI法が採用できるかできないかという一番のポイントだと思う。多分。それは当たり前でしょ、これは解析上の話なんだから。同じ構成方程式で同じ手法で、健全容器と減肉容器の解析をした場合にこの比だけと違いますと。それで健全容器に対して0.9ぐらい、減肉の場合に強度低下しても認めましょうという話でね。縦軸と横軸はね、両方とも流動応力が入るわけですよ。塑性崩壊圧力の計算には材料特性として流動応力が必要でね。それは上下でキャンセルしちゃう。それはもう材料力学という考え方の基本です。それで応力集中係数の話を持ち出したでしょ。あれも見て唖然としたんだけどさ、応力集中係数の式と同じですよ。それは正しい。穴がない場合と穴がある場合で応力集中係数3で、もう弾性しか考えないという設計だったら、応力は3倍ということで設計するわけですよ。それは正しいんですよ。同じことをやっている。それを根本的に理解していない。

○小林先生がおっしゃることはちょっとおかしいと思うんですけども、今私が申し上げたのはそれをクライテリオンとしているからおかしいと言っているんです。たまたまこういう式が成り立つというのは、さっきの応力集中係数の例で申し上げたように、それはたまたまなのです。例えば疲労の話ですけど、ノッチ・センシティブティ・ファクター（切欠き係数）のような、破壊が伴うようなことについてもね、これ材質で違いますよね。材質と応力集中係数の値で違うわけですよ。だから右辺というのは色々な材料で考えたときに違って来るんです。形状係数じゃないんですよ。形状係数で決まるわけではない。

○ちょっとストップ。材質は同じ。

○今規格ですから材質は同じではないです。

○同じ容器で材質は同じ。それからもっと重要なのが破壊モードが同じ。塑性崩壊という。応力集中係数の話も全く同じ。脆性材料で線形弾性で破壊するんだったらそれで構わないわけですよ。だけど疲労ですって破壊モードを変えたらそれは違うでしょって。応力集中係数じゃなくて切り欠き係数になるわけです。そういう基本的な材料力学という学問が、あなた方2人は理解していない、それだけ。

○ありがとうございます。非常に熱のこもった真摯な議論が続いておりますが、当初鈴木理事からも申しあげましたように、お約束の時間まであと10分しかございません。そろそろこの辺りで一度会議を閉めたいと、こんなふうに思っております。つきましては、どうしてもこの取りまとめの議論をする、あるいは苗村審議官からご発言いただく前にどうしても発言をしたい方がおられれば発言していただいて、そうじゃなければ取りまとめに入っていただいたらどうかと思いますがいかがでしょうか。

○どうもありがとうございます。私の進行がまずくてすみません。白熱していて途中で止めるのは非常に心苦しいです。業界の方にお願ひしたいんですが2021年7月21日に私の方から質問を出しています。それから今回資料2-1を出しています。それに対してですね、文書で回答を出して頂けませんでしょうか。次回までにですね。そうすればかなりクリアになるだろうと思います。

○一応7月と今回の話は、一応鈴木理事と越野理事が3つの論点という中でp-M法側からの質問ということで取りまとめていただいて、その中に全て含まれていると我々考えています。これ以上ぐるぐる繰り返すとまた5年10年、先ほど島川さんの発言の通りとなりますので我々はこれで十分答えたというふうに思っています。以上です。

○KHKの技術基準策定プロセスの中に、質疑応答運用解釈というのがありまして、そこでは規格等に対して寄せられた質問に対して回答する義務があるんです。ですからその辺我々が感じたような疑問を投げかけられた時どう答えればいいのかということを示していただきたいです。ですから、今言ったように質問への回答を出していただければと思います。

○何度も私が発言して申し訳ありませんが、この議論はこれまで延々と重ねてきて、最終的に合意ができなかったわけでございます。その中で先ほど越野理事から説明をし、あるいは鈴木理事から趣旨の説明をしたように、今回を持って取りまとめようという考え方で議論してございますので、もう1回ここでツケ出しをすとか、ここでもう1回その資料を出せとかいうことは今

回の会議では考えておりません。お時間もそろそろとなっておりますので、ここでこれまでの議論を含めて取りまとめに入っていただけたらいかがでしょうか。

#### 6. 5 議題（7）その他

苗村審議官及び近藤会長から、本日の議論を以下のとおり総括いただいた。

○それでは苗村審議官よりご挨拶を頂ければと思います。よろしくお願いいたします。

○本日ご出席の皆様方におかれましては、経済産業行政、とりわけ高圧ガス保安行政に多大なご理解とご協力を賜りまして、この場を借りて改めて厚く御礼を申し上げます。本日の冒頭からの熱心な議論をお聞かせいただきましたけれども、本日議論されました共用適性評価の第2区分については、その重要性から国内では長期間にわたる検討、議論が行われてきているというふうに承知をしております。石油・石油化学分野を始めまして、あらゆる産業での国際競争力が一層激化しております。こうしたなか安全性を担保するということは当然の前提ではありますけれども、規格は実用化されてこそ意義があるというふうに考えます。経済産業省としましては、遅くとも2021年内には第二区分の減肉評価法の議論に結論を得て、国内でも実用可能な規格を速やかに策定できるよう、今回も含めて議論に参加させて頂いております。本日は技術的な論点3点など含めまして、それを中心にご議論を伺いましたけれども、p-M法、API法それぞれの手法について、考え方や評価方法は異なっているため、一つの手法を選択するための議論をこれ以上継続するよりも、事務局提案にあります通り両者の違いですとか特徴を十分に理解していただいた上で、いずれの評価法を適用するか事業者が判断できるようにすることが重要ではないかというふうに思っております。双方の評価手法を規格として許容する方向で検討して頂くのが有益ではないかというふうに思っています。引き続き集中的な検討は重ねていただきまして、是非年内に結論を得られるように関係者のご協力を賜りたいと思っております。当方も協力して参りますのでどうぞよろしくお願いいたします。

○苗村審議官ありがとうございました。最後に時間が少なくなってしまったんですが、KHK近藤会長よりご挨拶をお願いいたします。

○本日は長時間にわたる熱のこもった本当に真剣な議論をしていただいたこと、心から感謝を申し上げます。高圧ガス保安協会といたしましても、苗村審議官が示されました方向性に賛成いたします。本件は長年にわたる懸案事項となってまいりましたけれども、この数ヶ月の間、技術的な論点について双方の考え方を整理をし、両論併記という一定の方向性を示すことができたと考えております。p-M法とAPI法、両者の相違はあるものの、双方を認めることにより事業者の選択の幅が広がり、規格としての利便性は向上するものと考えております。また国内海外の双方の考えを認めることで、日本独自の方法の発信に加え、規格の国際調和の面でも有益な



ものとなると期待しております。本日いただいた議論を踏まえまして、最終的な規格改正案の形にまとめまして、年内に実質的な検討を終えます。その後書面投票、パブリックコメントなど経まして、年度内には改正手続きを完了したいと考えているところでございます。引き続きのご協力をお願いしたいと考えております。最後に、本日の議論に至るまで様々なご尽力をいただいた経済産業省の苗村審議官、佐藤室長、委員長の鴻巣先生、小川副委員長、分科会委員の中曽根先生をはじめ各委員の方々、並びにご指導いただいた小林先生に心から感謝を申し上げて、ご挨拶させていただきます。本日はお忙しい中誠にありがとうございました。

○近藤会長ありがとうございました。ちょうど定刻 12 時半ということだったので、本日の供用適性評価規格委員会、高度化検討分科会の合同開催を終了いたします。事務局より今後の予定についてご連絡いただければと思います。

○次回の委員会につきましては、現在 12 月中旬を目途に開催するよう既に日程調整を開始しております。決定次第お知らせ致します。なお、今回は供用適性評価規格委員会のみで単独開催を予定しております。事務局の連絡は以上でございます。

○今 12 月の開催について、ご予約を皆さんにお伺いしてと思います。年末で皆さんお忙しいかと思しますので、ご予約についてなるべく早めに事務局の方にお伝え頂ければ、早めに日程を決定できますので引き続きよろしくお願い致します。すみません以上です。

以上