

PTS 評価計算における安全性の考え方について意見を述べる。

1. 破壊靱性値 K_{IC} 、応力拡大係数 K_I は不確かさを有する

PTS 評価は、圧力容器照射脆化の不確かさと双壁をなすほど技術的には不確かさが関係存在する課題だと考える。

下記図 1 は、JAEA の研究報告会資料「高見澤 悠」によれば、「破壊靱性値 K_{IC} 、応力拡大係数 K_I は不確かさを有する→不確かさを考慮して、合理的な破損頻度を求めることが必要」とされており、破壊靱性（破壊に対する抵抗力）および亀裂を想定した破壊力（応力拡大係数）の両者ともに 1 本の線ではなく、大きな帯状の幅（不確かさ）を持ったものであると認識されている。

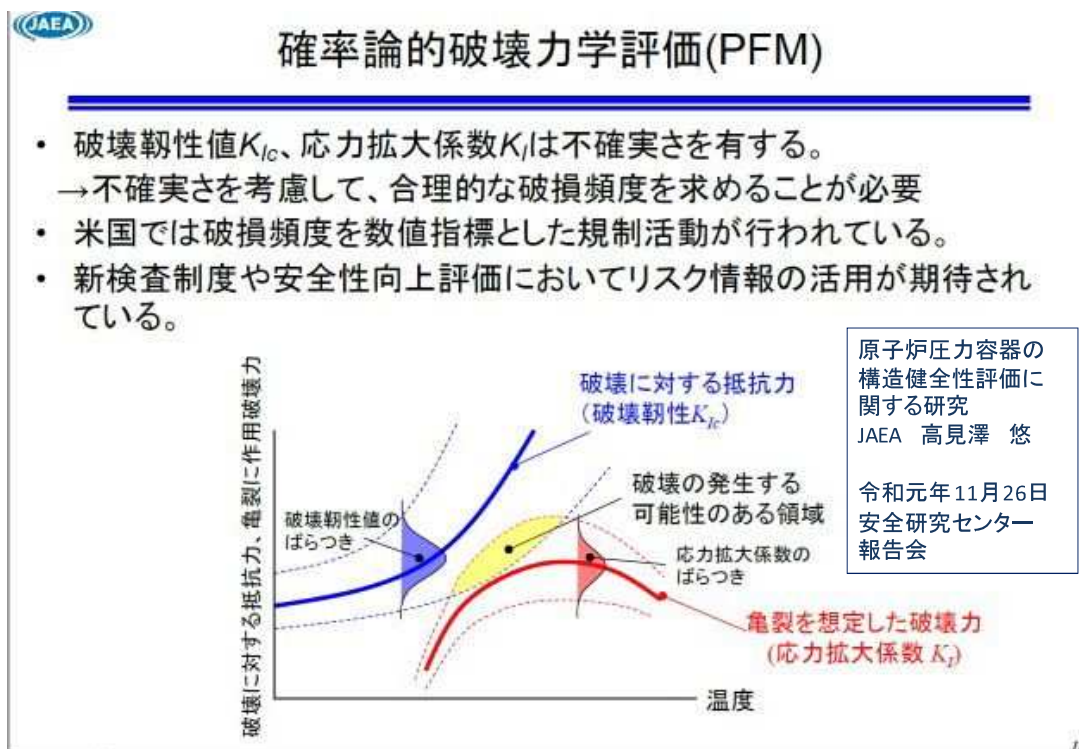


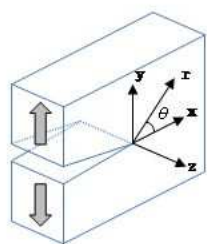
図 1 破壊靱性値と応力拡大係数は大きな不確かさをもつ

前者については、別に論じるので、ここでは後者の問題すなわち、加圧熱衝撃（PTS）に関して論じる。

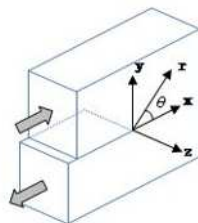
2. 加圧熱衝撃 (PTS) はなぜ不確かさが大きいのか

① 亀裂の存在を仮定した破壊力学に基づくこと

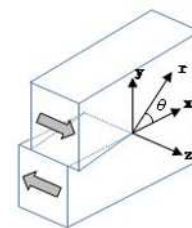
PTS で扱う破壊力学は亀裂の存在を仮定 (想定) して K 値を求めること自体が、単なる応力評価の問題以上に難しさを伴う。K 値は、亀裂先端の値を求めるといっても、亀裂の寸法 a のルートと応力値 σ の積として表現されるが、この時の応力は周囲の応力分布 (応力の方向と応力勾配) によって決定づけられる。K 値には、引張応力により亀裂を開く方向の「開口型 (モード I)」と面内でずれる方向の「面内せん断型 (モード II)」および面外にずれる方向の「面外せん断型 (モード III)」の変形様式によりそれぞれの K 値が求まる。ひとつの亀裂にそれぞれの変形モードの K 値が重ね合わせ可能 (線形重ね合わせ) として 3 つの K 値の合計として亀裂進展に対する K 値が求まる。



開口型 (モード I)



面内せん断型 (モード II)



面外せん断型 (モード III)

図2 亀裂の開口のしかた (モード)

PTS においては、鋼材表面の亀裂を引張応力により開く I のモードの荷重による亀裂の進展を評価するものである。厳密には、他のモードの荷重が多少混在していたとしても、支配的な荷重は開口型であることは確かなので、ここでの K 値は、亀裂を引っ張って開口する方向のモード I の K 値を問題にしている。

3. K 値は、FEM あるいは簡易的な手法で求めることができる

K 値の評価は、亀裂近傍の FEM 解析の系統的に求めた Raju-Newman の結果を引用しつつ評価することや、新たに FEM 解析で求めることもできるが、手法としては一定程度確立していると考えられる。ただし、応力の発生する過程は複雑な現象である。なお、K 値の代わりに J 積分という値で表す方法もある。

4. PTS問題は物理現象として複雑で時々刻々変わる過渡現象である

PTS問題は、原子炉内への冷却水の流入、それによる鋼板への熱伝達、鋼板内部の熱伝導による熱応力の発生、原子炉内の水圧により発生する引張応力等による亀裂先端のK値を求める複雑な解析である。なお、熱応力と容器内の圧力による引張応力は別々に求めて、後から加算できる（線形重ねあわせ可能）ものとして扱われる。

5. 過渡現象で時刻歴応答を求め最大値を求めるむずかしさ

—事故時の条件は最も厳しい条件として設定できているか—

PTSの評価が難しいことは、熱応力によるK値を求めることだが、熱応力は時間と共に変化する過渡現象（時刻歴応答）である。原子炉压力容器本体は約300°C近い状態から、緊急炉心冷却装置の作動で約27°C程度の水が原子炉の内壁を急冷することで、時間と共に鋼板内の温度が下がっていき、やがては鋼板の板厚方向のすべての位置で温度が27°C一定になる間で、それぞれの温度におけるK値を求めることになる。この時、重要なことは、脆性遷移温度との関係で論じるため、時刻歴の温度とその時々刻々変化する応力およびK値の関係として評価される。

さらに外力として熱応力以外に原子炉内の圧力があり、大LOCAの時には、熱応力が発生する時には圧力はゼロになると仮定しており、小LOCAの時には、温度の低下（熱応力）は大LOCAほどではないが、圧力は直ぐには下がらないので一定の圧力がかかるとしている。

つまり、ここで想定している「事故条件」がK値の算出において、すべてを代表していると言えるか、冷却過程における熱応力と圧力が抜けるタイミングは保守的な条件になっているか等が問われる。特に過酷事故（重大事故）時には温度が低下した状態で炉内が高圧になることはないと言い切れるか、例えば事故時に入れる冷却水の温度を27°Cとしているが、冬季の寒冷地で事故時に外気温に近い冷却水を入れることがないとは保証できない（設計基準事故を超える条件）ことなどを考えると、少なくともここで代表している荷重と温度条件がすべて事故時に発生しうる最も厳しい条件をカバーしていると言い切れることは極めて難しいと考えざるを得ない。

PTSが発生した場合は、原子炉が脆性破壊（亀裂が音速に近い速度で進展し大型の容器を完全に破断する可能性がある）する本現象の重大さからみて、それぞれのパラメータを最も厳しい値として設定することが、大事故を防ぐことになる。もし、主要な要因のひとつを甘く見て厳しい評価を（結果として）見落としてしまうことは、何としても避けねばならない。「めったに起きない」とか、「起こりにくい」との理由で発生の可能性が少ないとして厳しい評価をせずに、曖昧さを含んだ評価をしてはならないことは、福島事故の最も重要な教訓のひとつであったはずである。特に、不確実な事故時の現象を「ベストエスティメイト」と称する手法で、このパラメータの最悪の組み合わせをせず、発生頻度を基本にしてもっとも発生する蓋然性の高い現象を

評価対象にすることは、安全側のアプローチではない。このような、重大な結果を招く可能性がある不確実な現象を評価する場合には、現実には起こり得るかという議論をひとまず置いて、グレーゾーンの問題（下図2参照）として「不確かな問題は安全側（保守的、ここではPTSが起こるかどうかわからない場合には起こるもの）と見なして評価する」ことが安全性を確保する上で、最も重要な考え方である。

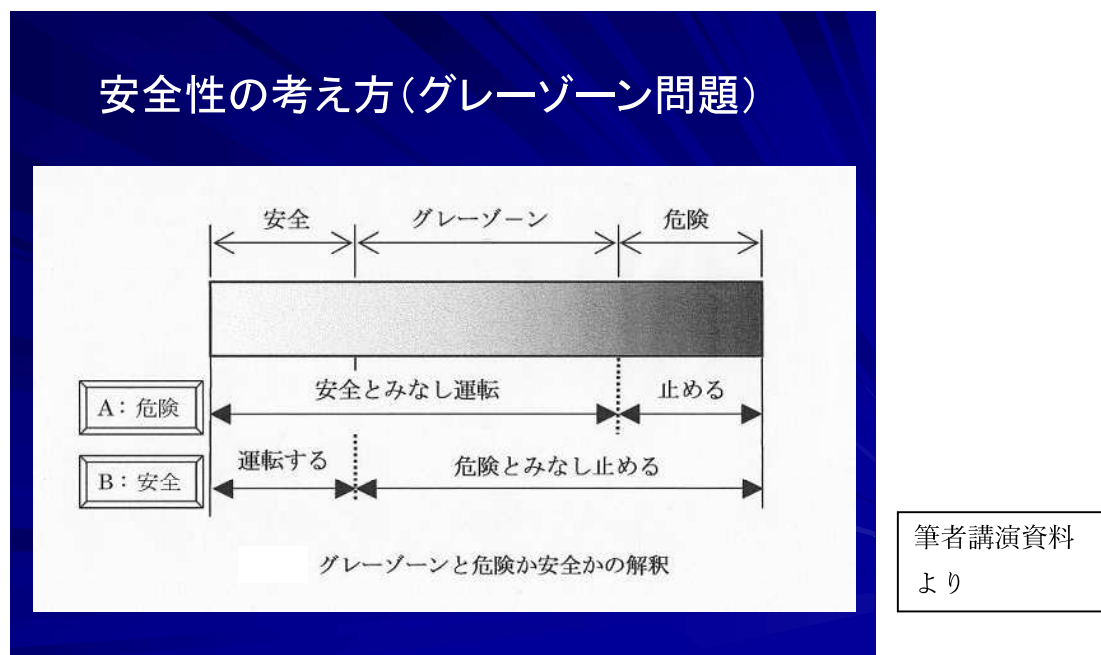


図2 グレーゾーン問題

図2はグレーゾーンにおける運転するか止めるかを安全性の観点から評価するべきであることを示しているが、それをPTSにおける熱応力の評価の問題に置き換えてみる。例えば、熱応力の発生に不確かさあるいは不確実さがあるグレーゾーンの場合には、事象の発生頻度に関係なく、「熱応力が大きくなる」ことをあえて選択することにする。現象として、そのようなことが起こるかどうかわからないグレーゾーンにおいて、もしその現象が起こるかどうかわからないからとして、そのことによる熱応力の発生が増加する要因を無視した場合には、その判断誤り（危険側誤り）が重大な結果をもたらすことが想定される。したがって何が真実かわからない場合には、あえてそのことが起こるものと保守的な仮定をして評価することが、最も堅実な方法である。保守的な仮定をして、仮にそれが間違った場合（安全側の誤り）は、事故を起こすことにはならないが、危険側の誤りは許されない。

事故対策において、何が真実かわかること、予断を排して厳格に評価することの必要性は十分認められた上で、それでも不確実性が残る場合には安全性を基本にした評価

を行うべきである。

特に、クラッドの影響は、温度分布への影響だけでなく、溶接残留応力が働くことから重要な不確定要因だと考えるが、その評価方法確認されているのか、実際にどこまで正確に評価されているのか、確認が必要である。

一般に、構造強度設計上は、延性破壊（脆性遷移温度以上での破壊）に関しては、外力に対する応力で評価し、溶接残留応力のような内力による力は、考慮しない。脆性破壊や疲労破壊においては、局所的な溶接残留応力が破壊に寄与すると考えられる。

しかしながら、溶接残留応力は、幾何学的形状や材料物性値、母材との接合状況等、多くの無視しえない不確かさを含む問題であり、設計上特定することは困難である。少なくとも溶接残留応力の評価方法とそれがどの程度、脆性破壊発生に影響するか証明されていなければ、安全性の証明にはならないことになる。

6. PTS の計算における「クラッド」の問題がある

① クラッドは強度部材とみなせないこと

このことは、「PVP-3420 クラッド容器に関する強度評価上の取り扱いについての規定（2008）」で明記されている。

その理由は、（推測するに）クラッドは、そもそも原子炉容器（低合金鋼）内面に腐食を避けるために、ステンレス鋼で肉盛り溶接したもので、金属加工工場で圧着等により製造したクラッド鋼板とは異なり、溶接ビードの管理や物性値、表面の仕上げの程度、母材との境界面の溶け込み、クラッド層の厚さの限度（解析で評価してよい値）等様々な点で、強度部材とするには、施工上あるいは品質上、仕様の設定やその確認方法等において無理があると考えられる。特に縦横の溶接線が重なるところは、繰り返し熱履歴を受けるので、脆化が進んでいる可能性もある。そうした視点からクラッドは原子炉本体の強度部材（1次応力を受ける部材）としては扱えないということは明らかである。

② クラッド部の厚さが全厚さの 0.1 倍を超える場合は熱応力を算出すること

規定「PVP-3420」で「(3) クラッド部の厚さが全厚さの 0.1 倍を超える場合は、クラッドを含めたモデルを用いて熱応力を算出すること。」となっている。また、「(解説 PVP-3420) クラッド容器に対する強度評価上の取り扱いについての規定」によると、『クラッド厚さが全厚さの 0.1 倍を超えない場合は、クラッド部の存在を無視しても良い。「全厚さ」とは、クラッド厚さと母材厚さとの和をいう。「クラッド部を含めたモデルを用いて熱応力を算出すること」とは、温度分布計算および熱応力計算において、クラッドを計算モデルに含めることをいう。また、この場合でも強度評価には母材および母材部の応力のみを用いる。クラス 1 容器で、クラッド部の厚さが全厚さの 0.1 倍を超えるものとしては、小口径管台の先端部がある。』（以上『 』内は引用）

とされている。

この記述から、クラッド部の厚さが全厚さに対して薄い場合にはあえて検討しなくても良いと読める。

7. クラッドによる熱応力の影響の見方と亀裂先端位置における K 値の評価

上記のクラッドの技術的な評価の見方を検討してみる。

- a. 元々、圧力容器本体の強度にはクラッドは入れていないので、実際にクラッドがあっても強度上問題ないと考えていた（と推測される）。
- b. ところが、熱応力を計算するにあたって、クラッド層が本体の厚さにくらべて相対的に大きくなると、クラッド層の伸縮による熱応力が応力として無視できないと考え、クラッド層が全厚さの 10% 以上の場合には、クラッド層を含めた熱応力を求め、その荷重（熱応力）をクラッドを除いた本体だけで強度評価をすることにしたものであろう。

つまり、強度部材ではないクラッドが熱応力を増加させることがあるが、クラッド層が 10% 以下の場合には、無視しても影響が小さいと解釈したのではないか（推測であるが）。

- c. 図 3 にクラッドのある時とない時の温度分布とそれによる熱応力の分布図（推定）を示す。

この図で、上図が 2007 年版のクラッドのない状態、下図が 2016 年版のクラッドがある場合の図であるが、K 値の計算は、亀裂先端位置での K 値を計算している。

上図で、（大 LOCA では）約 300°C であった鋼板の表面が約 27°C に急冷され、表面の熱応力が徐々に下がり亀裂先端位置での熱応力 σ_1 となっているとする。それでは、下図のように現実的なモデルとしてクラッドを考慮して温度分布と熱応力 σ_2 を計算すると、構造部材としてクラッドを考慮した場合の亀裂先端の応力は $\sigma_2 < \sigma_1$ となりクラッドがないとした時の応力より、明らかに小さくなる。

もともとクラッドは腐食対策として溶接肉盛したもので、相対的に薄く原子炉本体からみれば、2 次的な存在であるから、不確かな問題はあるものの、強度評価上クラッドは無いものとして評価することにしたように読める。

クラッドがない場合とある場合で、温度分布や応力分布を考える。2007 年版では、クラッドという言葉は全くでてこない。したがって、ルールを厳格に読めば、クラッドが存在しない状況で評価するべきとみなされる。なぜなら、すでに述べたように、“クラッド”は様々な影響があるので、部分的にクラッドを考慮することは、安全性の観点から好ましくない。

よって、クラッドを考慮する場合には、温度分布、熱応力、クラッドと本

体との相互作用、溶接残留応力等が、評価可能な状態になっている必要がある。

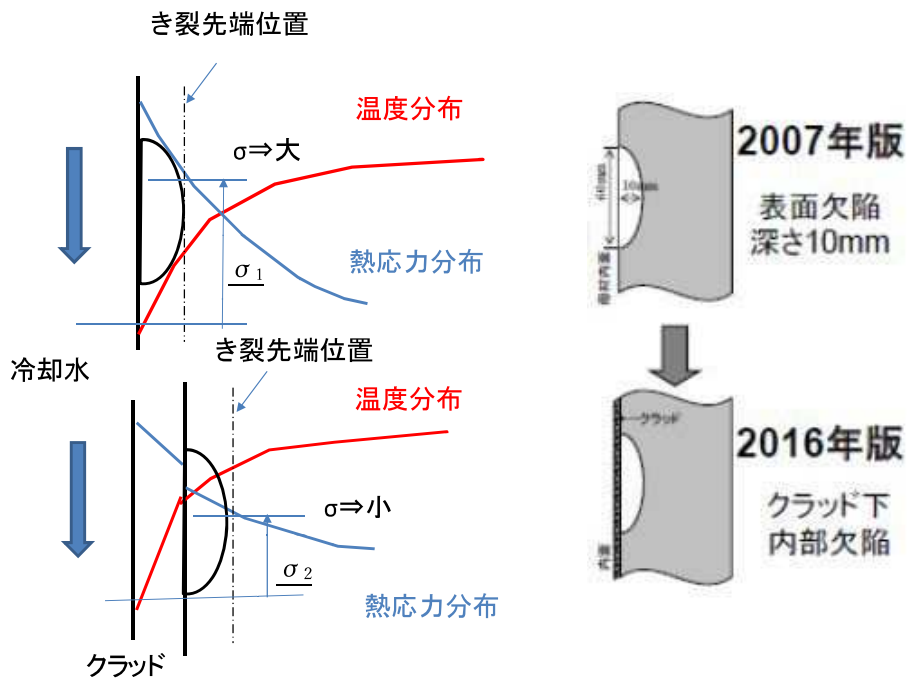


図3 クラッドの存在と亀裂先端位置の応力

クラッドは、クラッド内で温度勾配ができることを考えると、図3のようになる。

図3の下図のように、クラッドが存在すると表面の応力から亀裂先端の応力が σ_2 となり、図3の上図のクラッドがない場合の応力 σ_1 に比べて小さくなり、クラッドがある場合の方が、クラッドがない場合よりも明らかに小さくなる。

物理的には上記の評価は正しいとみなせるが、果たして実際の評価においてこの評価が安全性を基にした場合に合理的だと言えるか検証してみる。

まず、温度分布と熱応力分布が図3の下図のようになることを考えるためには、少なくとも下記のことを示さねばならない。

- ① クラッドは鋼板の表面にきちんと密着し、はがれていないこと。
さらに、長期にわたって密着性が損なわれないこと。
- ② クラッド表面の形状と清浄度。

- ③ クラッド層の厚さの特定。また、その厚さは基本的に変わらないこと。
- ④ クラッド層の熱伝導率、ヤング率、降伏強度等の物性値が求まっていること。
- ⑤ クラッドという腐食を対象にした部材に強度を保証できるか。

などを考えると、少なくとも温度分布や応力分布にクラッドを考慮して下の図のクラッドがあると仮定して求めた亀裂先端の応力 σ_2 で評価することが、合理的かただちには断定できない。

少なくとも、「強度部材にクラッドを考慮しない」ということは、安全側に解釈すると、クラッドを考慮して求めた応力分布は、クラッドの無い状態の鋼板表面からの図の上図に当てはめて、応力はクラッドのない状態での亀裂先端位置での評価を実施すべきと考える方が妥当と思われる。

もし、許認可上、(クラッドが厚さ 0.1 以下であった場合に) 仮に下図のクラッドを考慮した解析でそのまま亀裂先端の値を求めると、本来クラッドを無視して求めた上図(正規のもの)の亀裂先端の値より小さくなってしまいます。これでは、恣意的にクラッドがあるとした方が K 値が小さくなるため、かつてクラッドの考慮してこなかったこととの整合性が問われる。考慮するなら、すべての要素を同時に評価しなければならない。

九州電力がクラッドを考慮した解析としているのは、図3の下図の2016年版のクラッドがあった場合の解析図のように、温度解析にはクラッドを考慮し、その温度分布に相当する熱応力分布をクラッドを仮定して求め、クラッド表面から応力が減少していき、結果として亀裂先端の応力を評価している可能性が高い。

現実にはクラッドが存在するとしても、PVB-3420では、「クラッド部を含めたモデルを用いて熱応力を算出する」とは、温度分布計算および熱応力計算において、クラッドの計算モデルに含めることをいう、としており、『この場合でも強度評価には母材および母材部の応力のみを用いる。』としている。

ということは、「荷重を求めるための熱応力の計算には、熱応力が大きくなる可能性があるクラッドの存在を義務づけるが、強度評価をする場合には、応力分布は、クラッドの存在を無視して鋼板の表面から亀裂先端までの分布を考えて評価すべき」とすることが妥当ではないかと考える。

【参考用】

クラッドの問題は、一般的に次のように考えることができる。

- ① 部材に働く荷重は、例えば軸力 F と曲げモーメント M とした場合に、図4の内左図は本体のみで、風による荷重が発生していたとする。
- ② 図4の右図のように、薄いカバーをつけると、風荷重は増えて F1、M1 にそれぞれ増加する。

この時に、物理的には薄いカバーも少しだけ強度を受け持つが、カバーの材質や形状強度など厳密には特定が難しくそれを保証することもできないので、強度は本体だけで受けることにする、といったことは実設計の世界ではよくある話である。

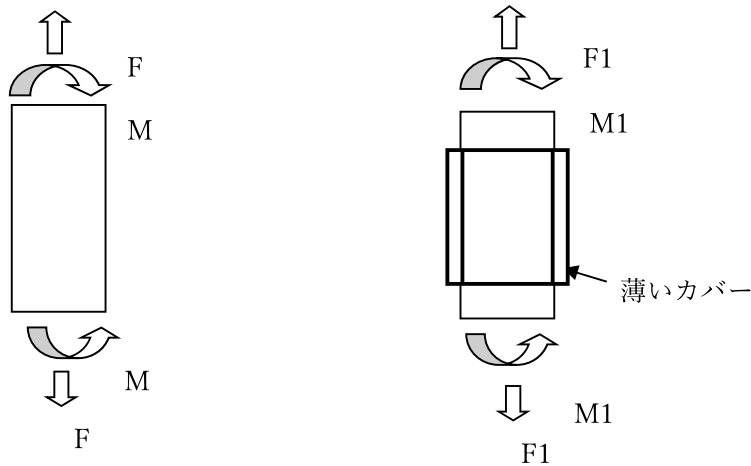


図4 風荷重を受ける構造物の薄いカバー

③ では、はじめからカバーを考慮するかどうかということは、ものの設計上、安全性の観点から下記のように考える。

- *物理的な確からしさが前提（風が吹きカバーに風があたることはあり得る）。
- *しかし、すべてのことを考慮できないから、技術的に影響を与える可能性がある因子を抽出し評価をする。評価した結果、危険側因子は見落とさないこと。また、危険側であってもその影響が無視しうるほど小さい場合には、無視してもよい。ただし、「無視しうるかどうか」は安全率（きちんと評価した安全余裕）に依存する。安全率が設定されていない場合には、評価基準がないので、都度審議することになる。
- *不確定な要因も含めて、荷重が増える方向(薄いカバーによる風荷重の増加)や風によるカバーの自励震動などが発生することがあればその影響を考慮する。
- *材質によるが、腐食して強度が減る可能性があるならば腐食を想定して減肉した厚さで強度評価をする。しかし、腐食で減肉した影響が他の因子に影響するかどうかは、判断が求められる。
- *物理的に強度が上がる方向の場合、その信頼性や影響の大きさから無視してもよい。しかし、強度に入れるなら、原則、関係する物理的根拠をすべて示す必要がある。
- *その他の想定される要因があれば検討するが、すべてわかるわけでもなく、不確かな要因による危険因子があれば、できる限り取り込むべきである。なぜなら、PTSカーブと脆化した材料の破壊靱性値のカーブが接することが評価基準になっており、危険側因子をどこまで吸収できるか明示されていないからである。データ処理のヤ

り方の中に、安全代があると言うなら、それ自身を明示しなければならない。

*破壊した時に重大な影響のあるものは、十分な安全代（安全率など）を設けるべき。

こうして考えた上で、図4において、クラッドが果たす役割を考えてみる。

- ① 物理的にクラッドがあるのだから考慮する、という考え方はあり得るが、その場合には、クラッドの影響する因子は原則すべての因子を考慮しなければいけない。
- ② ただし、クラッドの影響がどこまではっきりしているのか確認が必要。
特に、クラッドの物性により一つは、「クラッドが鋼板の冷却速度を速めるか、遅くするか」。つまり、「クラッドが、熱の伝達を妨げるカバーの役割をするのか、それとも母材以上に熱伝導率が良く、冷却を促進するのか」。もう一つは「熱応力を増加させるか減少させるか」である。
- ③ 熱応力を計算する時に、計算上大きくでるものに関しては、できるだけ最大の応力を考える。特に、溶接の残留応力は組み込む必要がある。しかし、その組み込み方を明確にすることは難しい。許認可上、明記せずにルール化はできない。
- ④ では、亀裂先端位置での評価を考えた場合に、図3の下の図のように、強度に関してもクラッドを仮定して亀裂先端の応力（K 値）で評価すると、明らかにクラッドなしの場合より小さな応力（K 値）になる。評価上それでいいのだろうか？
- ⑤ ひとつは、もしクラッドの寸法をはじめ（示されていない）詳細なデータが誤っていた場合に、クラッドを考慮することが、危険側の評価になるとするならば、それは原則として許されないはずである。
- ⑥ また、現実の圧力容器では、クラッドは厚さ 10%よりずっと薄いため、クラッドを考慮しろとは言っていない（多分 10%程度以下なら大して違いはないと考えたか）から、クラッドなしで評価したら、クラッドを考慮して求めた応力（K 値）より厳しい値が出てくるとした場合に、クラッドをつけた場合とつけない場合にどちらを採用すべきか、安全側の評価をするべきとの判断になるのではないか？少なくとも、いくつもある因子の内、危険側因子（K 値が大きくなる）は確実に取り込むべきで、安全側因子は、特定が難しい場合には、無視してもよい。

【まとめ】

規制基準の社会的な役割から、不明確な場合には常に『安全側に判断して決めるべき』で、仮にそれが不合理というのであれば、不確定な要因を危険側のエラーにならないようにひとつずつデータ示して確かめ検証する必要がある。少なくとも解析上不確かなことがあってはならないが、仮にあった場合には常に安全側に評価するかあるいは、その影響が十分許容範囲であることが、定量的に示されねばならない。それが、規制の責務である。原子力規制委は、少なくとも本規定を制定する時に、クラッドの問題を明記すべきであった。2007年版でクラッドについて何も触れず、事業者が恣意的にクラッドの部分的な評価

をしている

現行の、PTS に係る問題は、非常に不確定性の大きい（ばらつきの大きい）脆性遷移温度の評価と、時々刻々進む時刻歴応答という解析のみに頼った不確かさの大きい評価でしかなく、しかも両者のデータの重なり合いを評価する上で、安全率（差でも良い）あるいはそれに匹敵する指標さえ示されていない。各パラメータに多くの保守性が含まれていると言うが、溶接残留応力等、危険側因子等ある。亀裂の停止に関する議論もあるが、十分な評価基準ができていない。原子炉圧力容器の脆性破壊という、社会的に全く容認できない事故が想定されることから、広い意味で規制の在り方が安全性の原則（グレーゾーンは安全側に評価すべき）を必ずしも守っていないということになると、違法あるいは著しい過誤があると考えられる。

以上