原子力資料情報室老朽化ウェビナー第2回
2023年4月28日

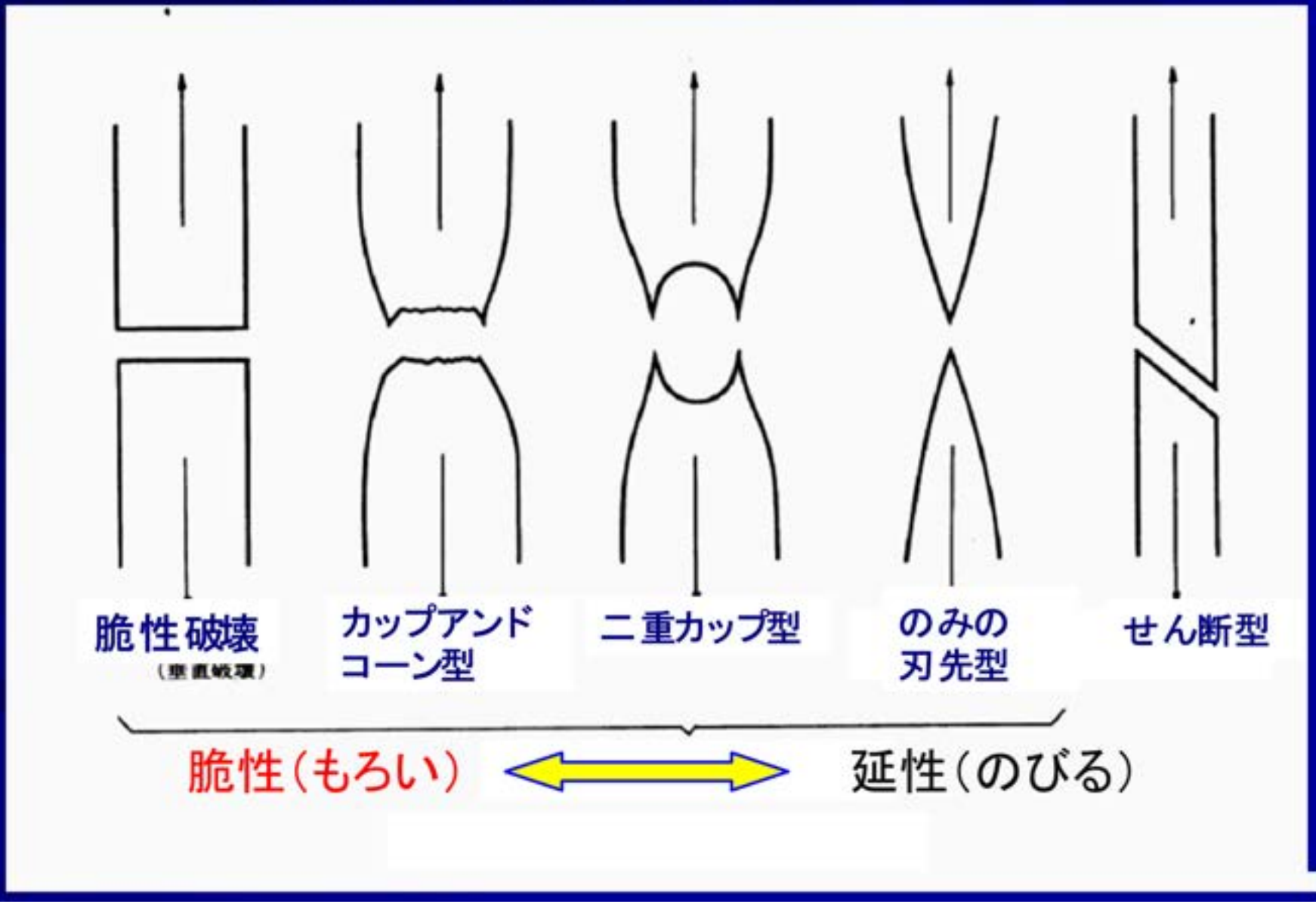
脆性破壊のリスクの大きさ

元原発設計技師
原子力市民委員会委員

博士（工学）　後藤政志

鋼材の引張り破壊モード(壊れ方)

試験体の丸棒を引っ張ると・・・



ものの壊れ方

延性破壊

一般に金属は荷重をかけると十分変形した後で破壊する。これを延性材料という。
破面はギザギザになっている。

脆性破壊

コンクリートやガラスは荷重をかけると亀裂が入り破壊する。これを脆性材料という。
破面は荷重に対して垂直な平らな面。

構造材料の破損

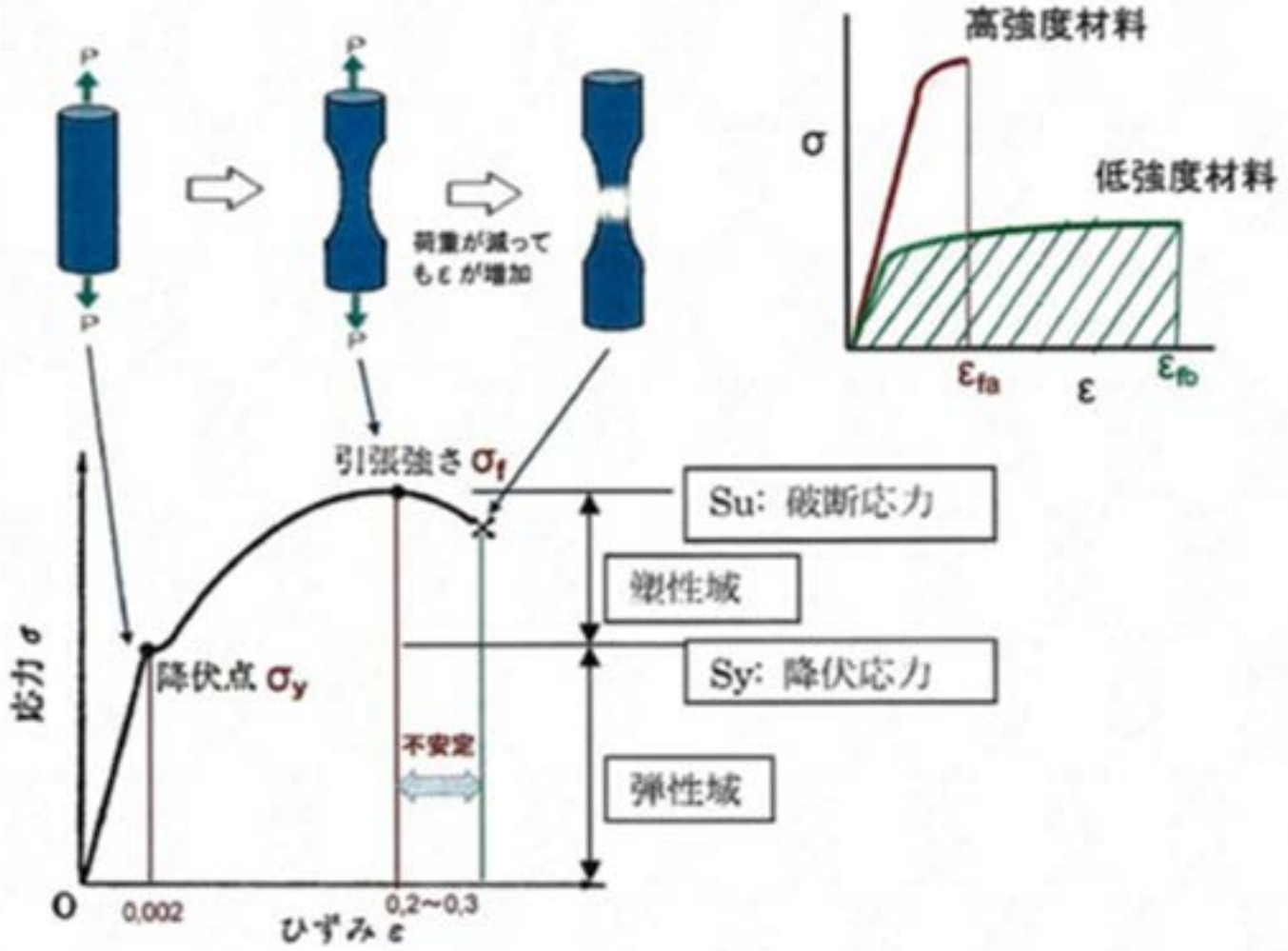
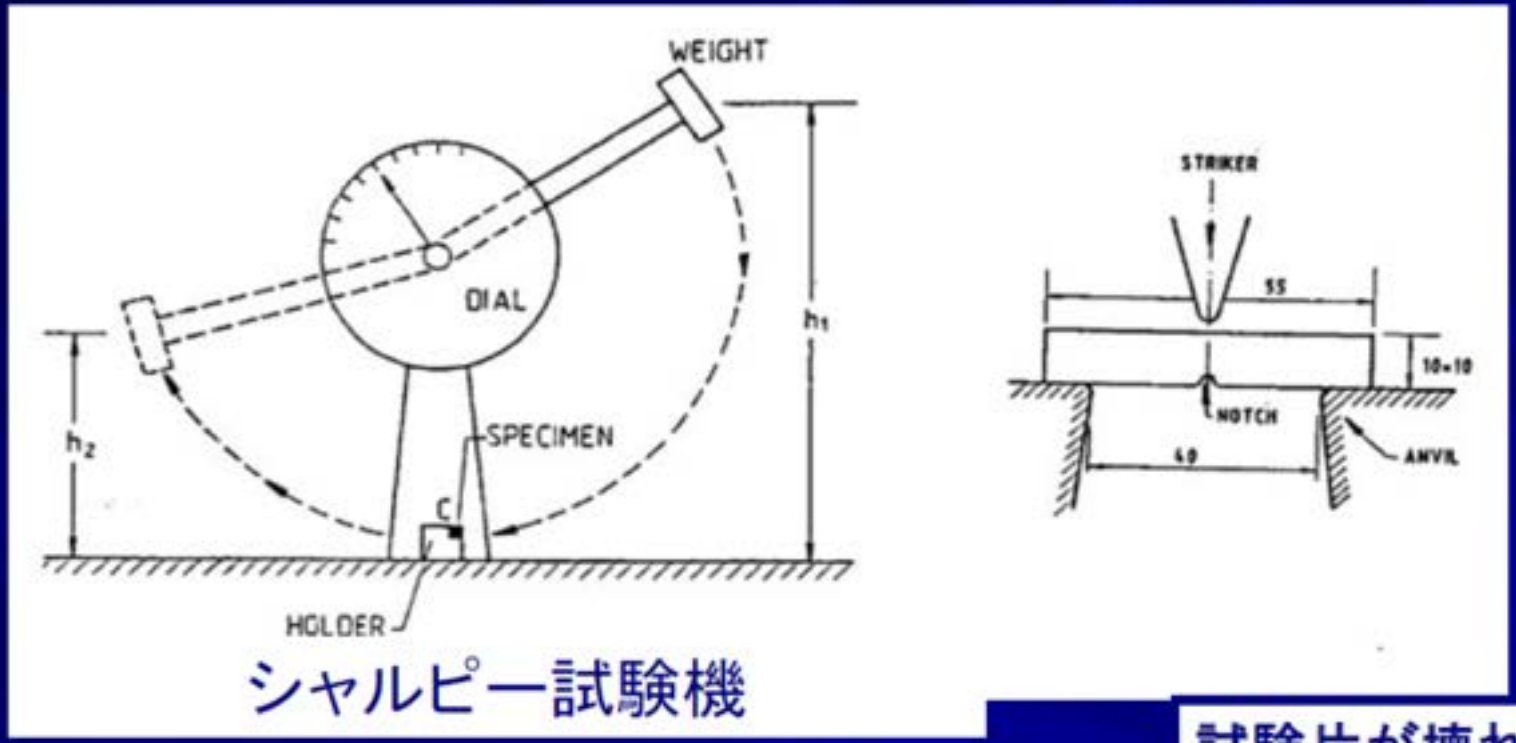
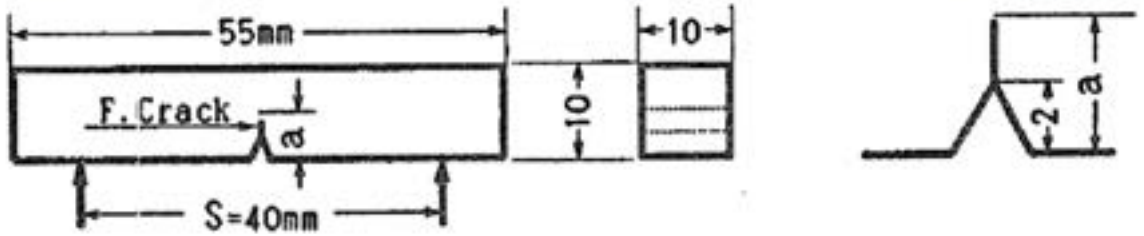


図 1　鋼材の応力—ひずみ線図

『ものが破壊する時の消費されるエネルギー』を測る！



シャルピー試験機



シャルピー試験片

試験片が壊れる時吸収されるエネルギーを計測する。

この吸収エネルギーが大きいほど破壊しにくい！

脆性破壊の特徴

◆発生しやすい条件

＊低温　　＊引張応力　　＊厚肉

＊溶接部等の欠陥　＊低荷重で発生　＊衝撃的な荷重

◆発生すると何が問題か

＊急激に壊れるため危険　＊亀裂が音速に近い速度で進む

＊小型のものより大型のものに発生する。

＊通常の材料強度よりはるかに小さい力で破壊する。

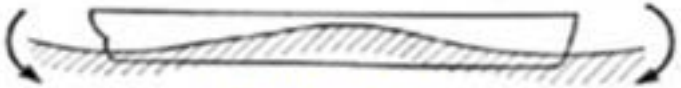
＊一旦脆性破壊が起きると、破壊（亀裂）はとまりにくい。

静かな海で突然船体が真二つに！

T2タンカー
スケネクタディ号

典型的な脆性破壊

◆波のない穏やかな海で発生！
◆波浪による設計荷重の数分の一の力で破壊



◆大音響と共に瞬時に破断
◆脆性破壊:溶接欠陥から亀裂が音速レベルの速度で進む！

写真:Wikipedia"スケネクタディ(タンカー)"より

船の壊れ方

◆船は、船体に自重や波による曲げ応力がかかる。（写真の図では）甲板に引張荷重がかかり、船底側に圧縮荷重がかかっていた。

◆甲板の溶接部（おそらく）の欠陥から、縦に亀裂が走り、大音響とともに、船体を真っ二つにした。理屈上は、船底は圧縮応力になっていたが、亀裂の進展力の方が上回った。

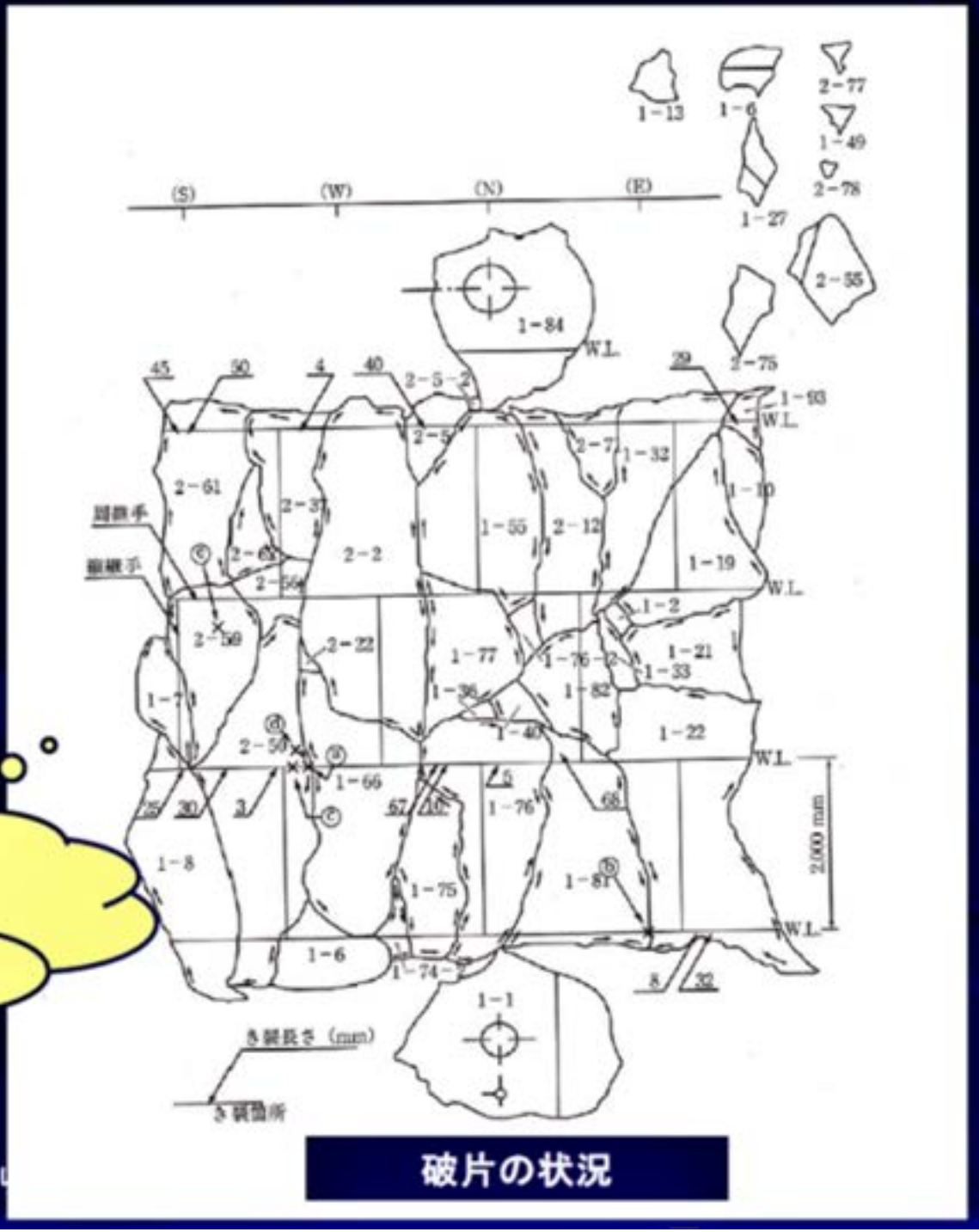
◆船体は、真二に割れたが、粉々にはならない。なぜなら、圧力による引張応力がかかっていないから。

【脆性破壊の例】

水添脱硫装置の反応塔

破壊は欠陥から発生した亀裂が瞬時に伝播し爆発的に破片を飛散させた。

容器の脆性破壊は破片が爆発的に飛び散る



破片の状況

小林英男　破壊事故、共立出版2007年より

圧力容器の壊れ方

◆圧力容器（原子炉やボイラ、脱硫塔はど）は、内部の圧力により容器全体に引張応力がかかっている。

◆前ページの脱硫装置の鋼板は、全体に（風船のように）引張応力がかかっているため、脆性破壊を起こすと、ばらばらの破片になって遠くまで飛散する。

◆原子炉の場合に、内圧と熱応力がかかるが、大LOCA（大規模冷却材喪失事故）では、内圧は（ほとんど）かからず、熱応力（引張）が破壊の原因となる。したがって、内圧がかからない場合にの原子炉容器の破壊は、次ページの図のように、亀裂が1本走る形なると思われる。

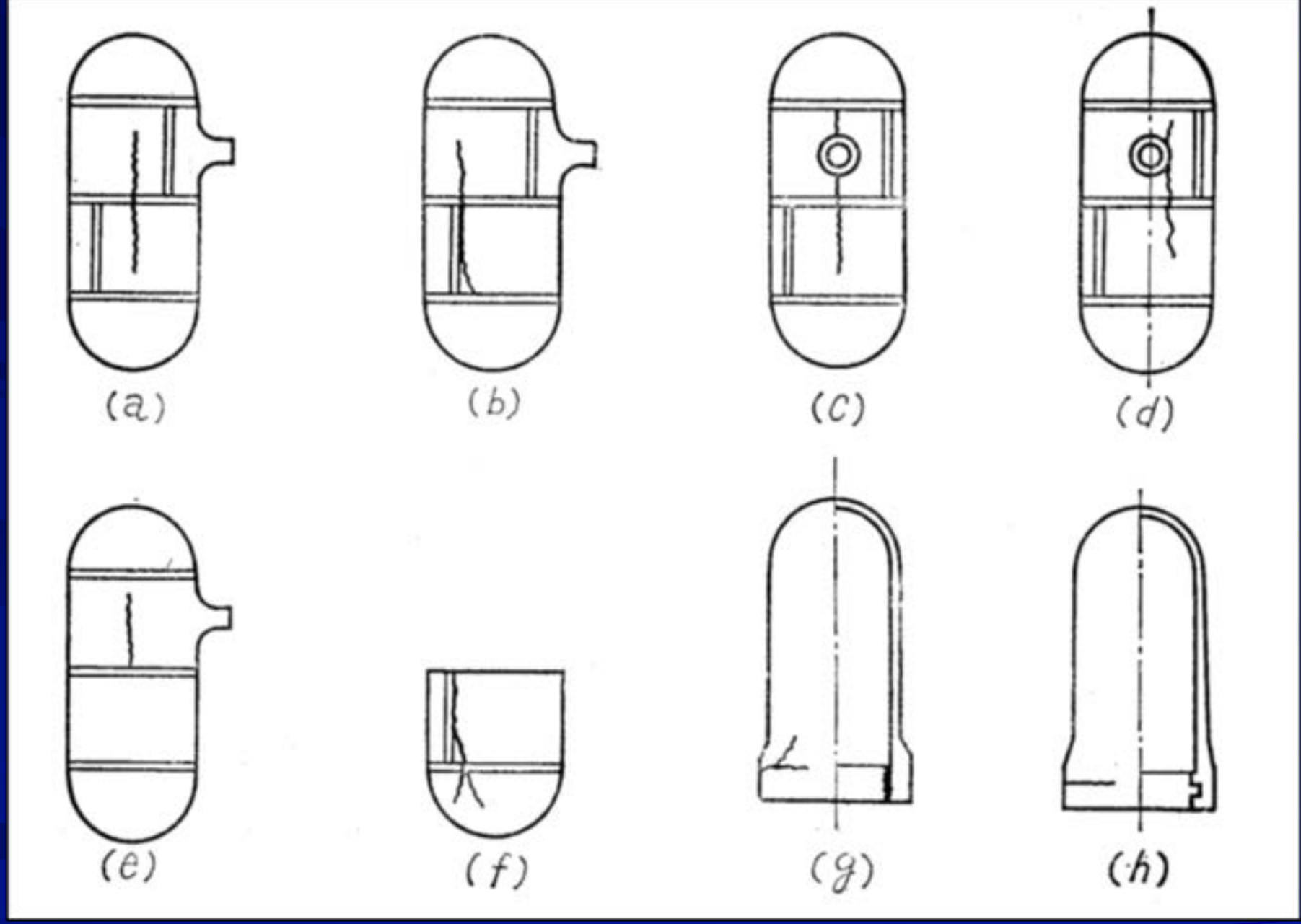
圧力容器の壊れ方（つづき）

◆中小LOCA等の内圧と熱応力が同時にかかると、いくつかの破片に分かれることも考えられる。

【まとめ】

圧力がかかった状態で壊れるか、熱応力で壊れるかで壊れ方は多少違うが、重要なことは、『原子炉が完全に破壊』してしまうと、冷却水を貯めることができなくなるため、一気にメルトダウンしてしまう。

原子炉として最悪の事故である。


(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
(g)
(h)

兵庫県南部地震(1995)における脆性破壊

◆低温　◆厚板　◆衝撃荷重

◆欠陥　◆材質　◆大規模構造

◆地震による『脆性破壊』はめずらしい！　⇒ひずみ速度(衝撃)

⇒延性亀裂から脆性亀裂へ　⇒繰り返し荷重で硬化　等

写真:園田恵一郎、小林治俊　大阪府立大学紀要・震災特別号1995年1月より

脆性破壊による壊れ方

◆ものが壊れる原因は、外部からかかる『外力』によるか、内部から発生する『熱応力』によるかで異なる。

◆外力による破壊は、一定の力がかかり破壊するまでかかる。それに対し、熱応力は破壊が進行すると共に力が減少する。

◆ただし脆性破壊では、亀裂が高速で走るので、熱応力が緩和される時間がないまま破壊することがある。また、温度が上がると脆性亀裂は止まる方向に働くが、亀裂が止まるかどうかは様々な条件が整わないと、亀裂が停止するかどうかは分からない。

欠陥の存在と発見

◆材料が脆くなると、溶接部やその近傍（溶接熱影響部等）に生じる欠陥が起点になり、脆性破壊を起こす危険性が高くなる。

◆超音波等の非破壊検査で一定の大きさ以上の欠陥は見つかる（はず）だが、大型の構造物では非破壊検査で100%みつけることは、限界がある。検査方法の限界と、人為ミスの可能性を防ぐべきだが、その保証がない。

◆健全性評価は、発見できる欠陥（亀裂）の大きさを仮定して荷重をかけて亀裂が進むかどうか破壊力学（はかいりきがく）を用いて計算する。

破壊力学の功罪と安全性

◆破壊力学の意味

構造強度計算では、一般に材料に欠陥がないことを前提に評価している。

しかし、実施には様々な欠陥があり、鋭い亀裂先端は応力集中の考えると、どれだけ小さい力でも物が壊れてしまうことになり、構造物の設計ができない。

そこで、亀裂周囲の応力勾配を考慮した応力拡大係数K値を定義して、その亀裂が進むか進まないか評価できるようになった。（応力集中係数無限大を解消）

$$K = A \cdot \sigma \cdot \sqrt{a}$$

K ： 応力拡大係数
A ： 応力場による係数
σ ： 亀裂周囲の応力
a ： 亀裂長さの半分

破壊力学の功罪と安全性（つづき）

◆破壊力学の使い方

亀裂がある材料の強度を評価できる。

＊脆性破壊・・・・・静荷重で亀裂が動くどうか評価する。

＊疲労破壊・・・・・繰り返し荷重で,K値の変化量を計算し
疲労亀裂の進展を評価

＊応力腐食割れ・・・腐食環境下における割れの進展評価

ただし、亀裂の力学である破壊力学は、慎重に評価をしないと、極めて危険な計算方法である。昔は、亀裂があったら必ず修理して欠陥の存在を許さなかったが、現在は亀裂の計算をして、亀裂が進まなければ、放置することもある。

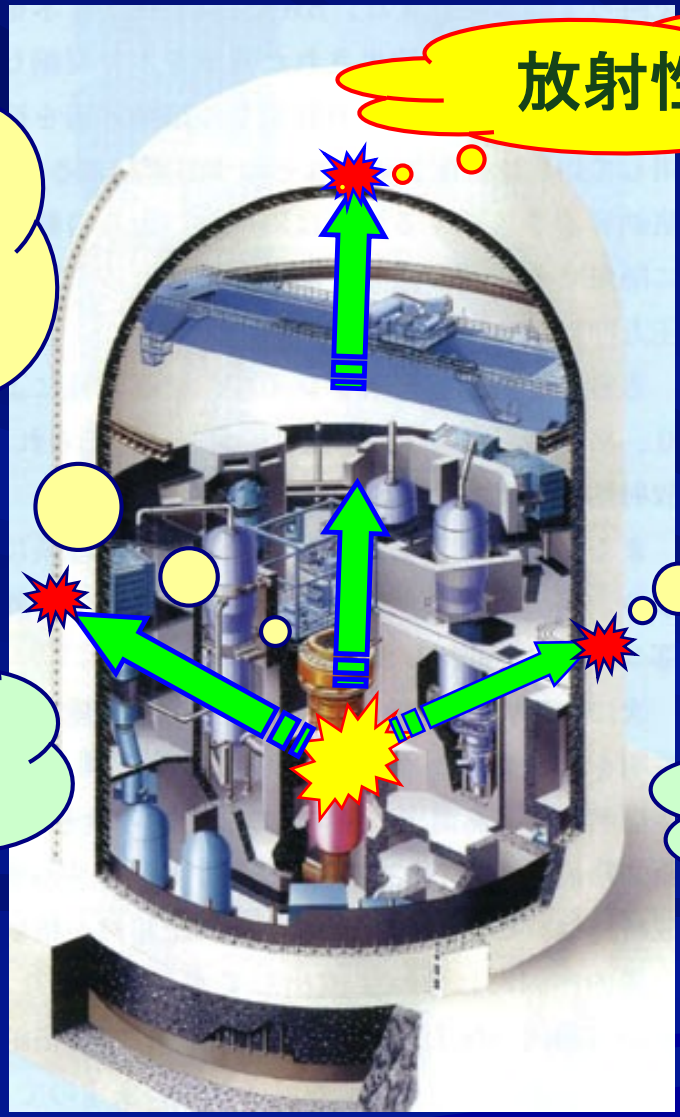
破壊力学の功罪と安全性（つづき）

◆原子炉（炉内構造物等）は、中性子を浴びると脆化して、遷移温度が上昇する。

◆「脆化する」ことは、金属材料の強靭な特性を失い、脆い材料になってしまうことを意味する。強度以前に、「金属材料ではなくなる」とみるべきで、脆化が一定程度進んだ材料は使用禁止にすべきである。

◆脆化した材料に、欠陥を仮定して破壊力学で亀裂が進むかどうか評価することは、①非破壊検査の見落とし　②亀裂評価の不確かさ、③脆化の定量的評価の不確かさ　等を考えると、決して安全な方法ではない。脆化した材料は廃棄。

PTSによる原子炉容器破壊は格納容器も同時に破壊する最悪の事故になり得る！



放射性プルーム放出

原子炉が破壊すると、核燃料もバラバラになり、一気にメルトダウンする。

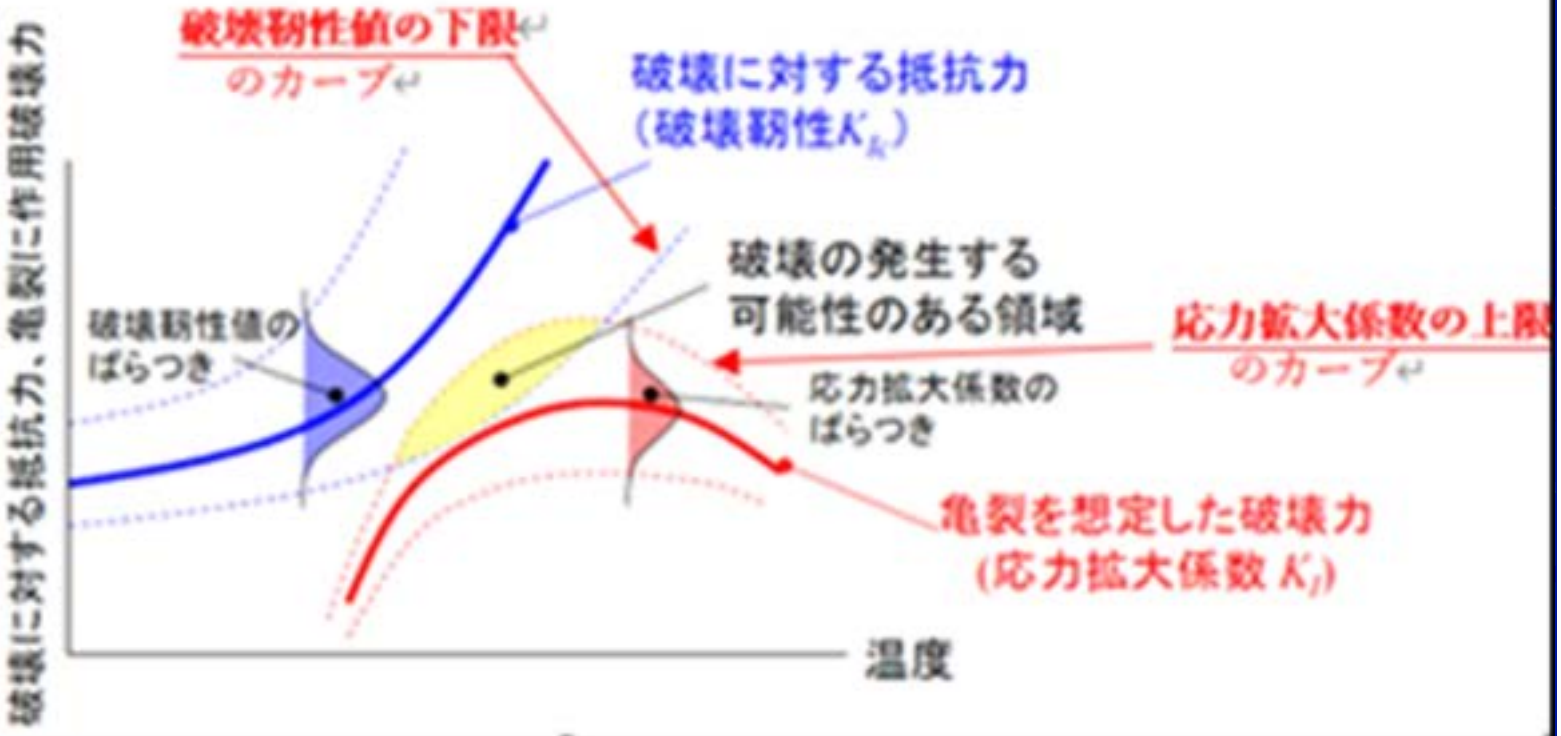
事故発生と同時に格納容器も破壊されると・・・

格納容器による多層防護も役に立たなくなる。

避難する時間もないことになる。

確率論的破壊力学評価(PFM)

- 破壊靭性値K_{Ic}、応力拡大係数K_Iは不確実さを有する。
  →不確実さを考慮して、合理的な破損頻度を求めることが必要
- 米国では破損頻度を数値指標とした規制活動が行われている。
- 新検査制度や安全性向上評価においてリスク情報の活用が期待されている。



脆性破壊のまとめ

鉄鋼材料は、常温では延性材料であるが、低温では脆性材料になる。さらに、中性子を浴びると脆化が進む。

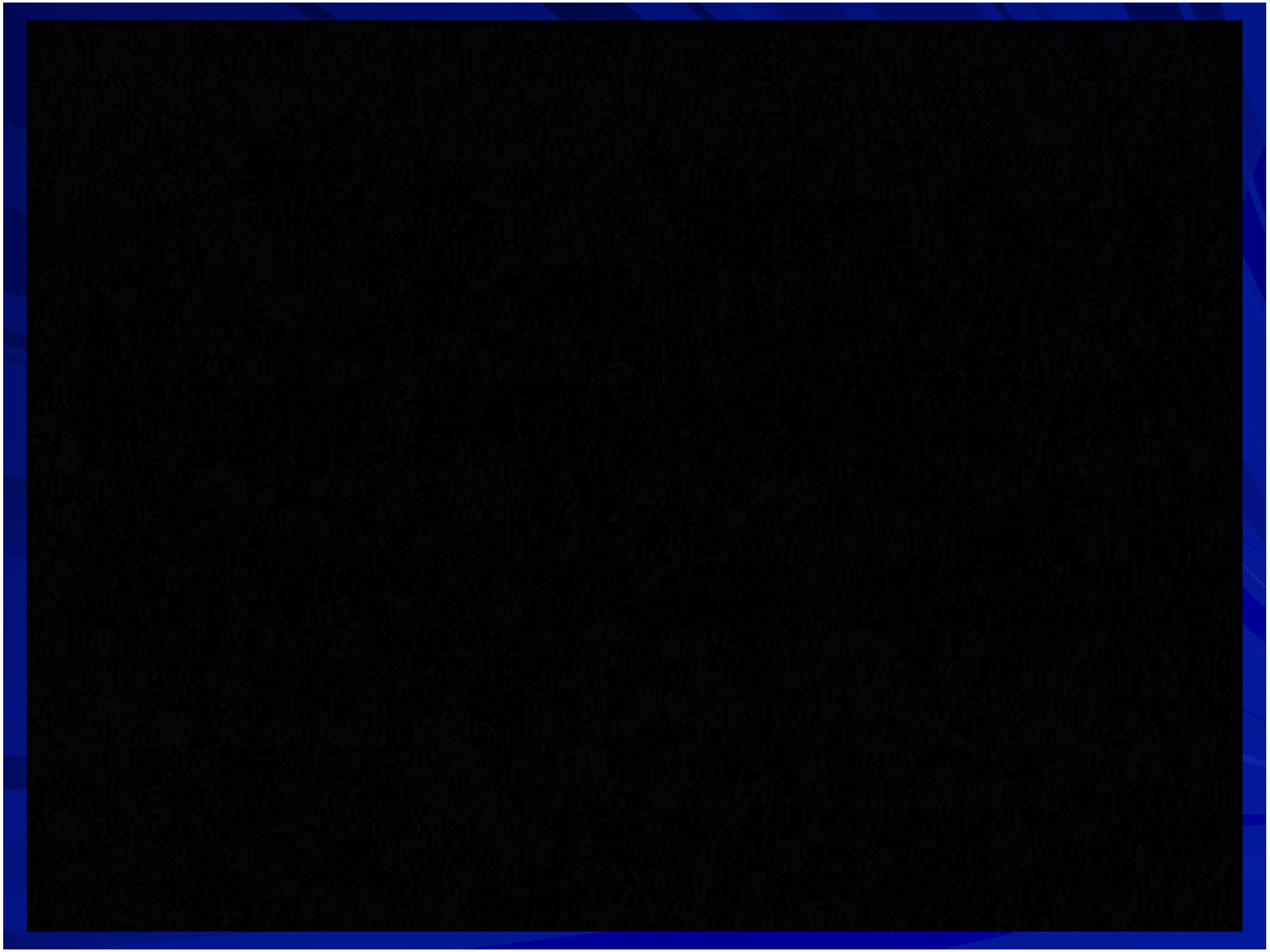
船舶や土木構造物、建築などは基本的に脆性領域では使わない方針を基礎にしている。阪神淡路大震災では、溶接構造や厚板大型柱などが、脆性破壊を起こし、問題になった。

原子炉では、長寿命化が模索されており、中性子脆化は極めて重要な問題になってきている。

原発は安全上、確実に事故を防ぐ方法が必要だが、原理的に事故を防ぐことができない仕組みになっている。

参考用資料

プレストレスコンクリート製格納容器の過圧破壊

米国サンディア研究所

圧力による破壊は、延性材料でも脆性的な破壊になる。