

原子炉圧力容器の 中性子照射による脆化 ---フクシマよりも悪いシナリオ---

姫宮利融

原子力発電システムの 技術的な2つの問題

- 使用済み核燃料の処分の方法がみつからないこと。
- 過酷事故の可能性と実績
(スリーマイル・チェルノブイリ・フクシマ)

2

原子力発電の事故史

- 1979 スリーマイル
- 1986 チェルノブイリ
- 2004 美浜原発(配管からの蒸気もれ、日本の原発で初めて死者をだす事故。ECCSが作動)
- 2007 柏崎刈羽(中越地震。材料(配管)が塑性変形をおこした。)
- 2011 フクシマ(東電福島第一原発)

3

目次

1. 金属の「強さ」。材料力学でよく行われる方法。
2. 金属とはどのようなものか？
3. 金属の(鉄鋼材料の)脆性破壊とは
4. 核物質閉じ込めでの圧力容器。照射脆化と呼ばれる現象
5. 脆化の予測モデルー脆化は予測できるか？
6. 脆化の「実績」
7. 疲労
8. エロージョン(美浜原発の例)
9. 「詰み」で勝負が終わるか「必至」なら終わりか？

4

金属の「強さ」。材料力学でよく行われる方法。

材料の「強さ」は想定する 破壊のストーリーに依存する。

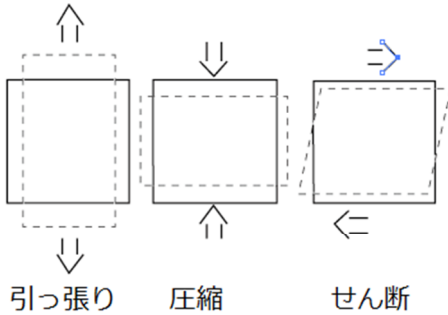
「強さ」	破壊条件(材料への攻撃)
破壊応力・降伏応力	静的な応力
靱性	衝撃
疲労限	繰りかえし応力
耐食性	腐食
耐エロージョン性	エロージョン

オールマイティに「強い」材料というのは難しい。「強い」だけでもいけない(加工性)

5

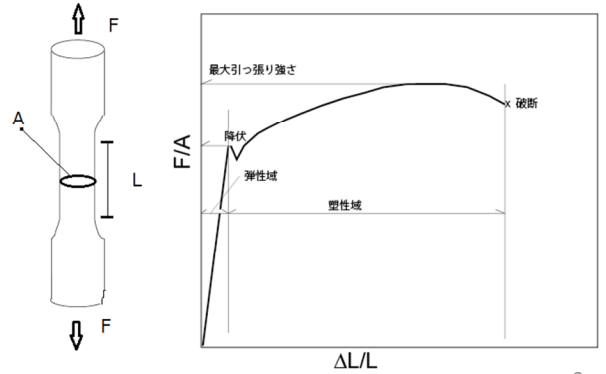
6

変形の様式



7

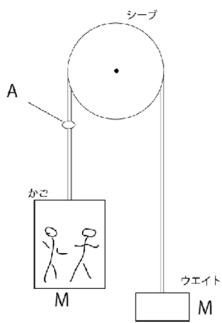
引っ張り試験



8

降伏応力の1/10で使う例 エレベーターのワイヤ・ロープ

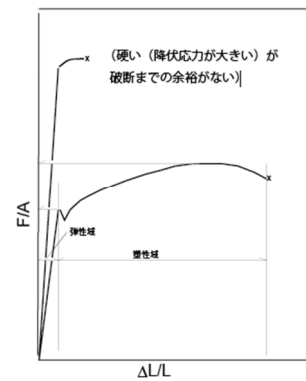
$$f = Mg/A$$



fが降伏応力の
1/10に収まるよう
にして使う。
のちに述べる「疲労」
を回避するために定期
点検の際にロープ
を取り換える。

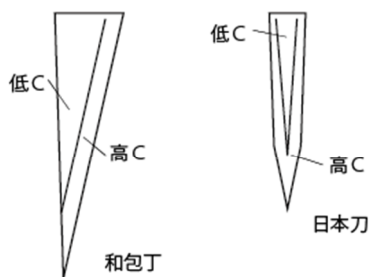
9

「硬い」が脆い (破断までに余裕のない)材料



10

硬さとねばりを両立させなければいけ ないものでは「合わせ」を使う



11

金属とはどのようなものか？

12

元素としての金属

元素の周期表
The Periodic Table

crystal と grain

crystal

- crystal (結晶)
- もととの意味は「水晶」
- 原子が整列しているので外形も幾何学的

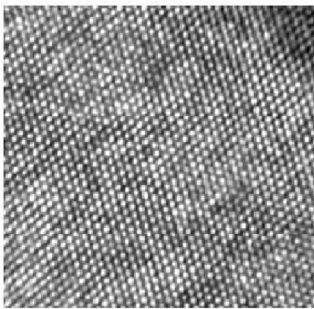


grain

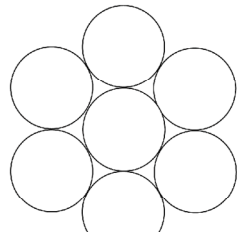
- 結晶粒
- もととの意味は「穀物」
- 金属材料はふつう多結晶



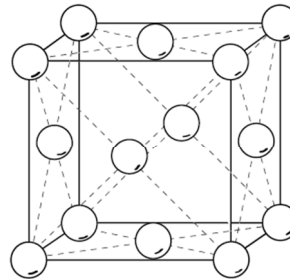
金属結晶は微視的にみれば原子が規則正しく配列している



(C)RYODEN KASEI CO.,LTD.

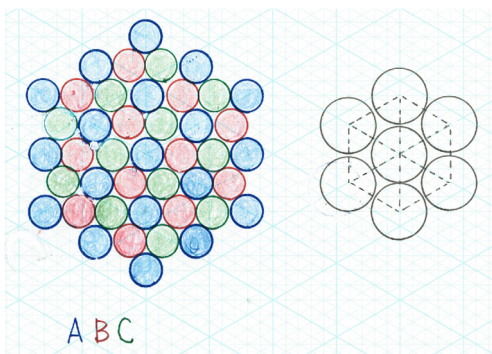


面心立方格子

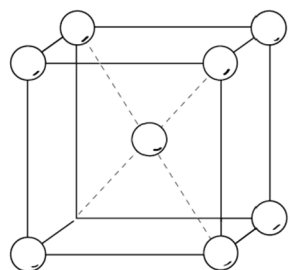


面心立方格子はface centered cubicとも呼ばれる。次のスライドで示すように稠密な原子層がABCA...という順番で並んでいる。一つの単位胞(立方体)には
 頂点に $1/8 \times 8 = 1$
 六つの面に $1/2 \times 6 = 3$
 合計 $1+3 = 4$ 個の原子が属する
 金、銀、銅、アルミ、ニッケルなど
 金属としては「素直な」性質のものが多い

面心立方格子での原子の置き方

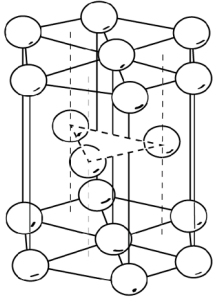


体心立方格子



体心立方格子はbody centered cubicとも呼ばれる立方体の頂点と立方体の中心に原子が存在する
 稠密ではない
 単位胞に
 頂点 $1/8 \times 8 = 1$
 中心 1
 全体で $1+1 = 2$ 個の原子が属する
 鉄(フェライト)は体心立方格子である
 fccに比べて癖がある

稠密六方格子

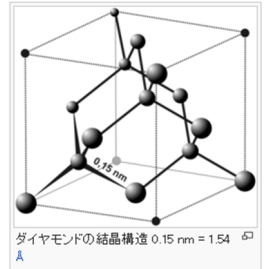


稠密六方格子は hexagonal close packedとも呼ばれる稠密原子層をABABA...の順に並べたものである
六角柱の底面と高さ方向では性質に違いがある(異方性がある)
亜鉛、マグネシウム、チタンなど六方晶の金属は「かわいいげがない」

19

共有結合

- 「共有結合」は複数の原子の間で電子を共有する。ダイヤモンドは炭素原子が、正四面体の中心にある原子が隣り合う4つの原子と電子を共有し合っている。(混成軌道)



20

イオン結合

- 食塩ではナトリウムが塩素に1つ電子を与えて陽イオンとなり塩素は陰イオンとなる。2種類のイオンはクーロン力で引き合い全体として結晶をつくっている。

21

金属結合——此処かと思えばまたまたあちら

金属では金属原子の外殻の電子は、個々の原子にしばられず、結晶内を自由に運動する(自由電子)。その、電子の海の中に電子に仲立ちされて原子(イオン)は結晶格子を形づくる。

イオン結合と違うのは、個別のペアをつくっていないことである。このことから、電気や熱の伝導性がよいこと、延展性があることなどの性質がでてくる。

22

狸の金玉は八畳敷？



- 金属というと「硬い」という印象を持っている人が多いが、本来、金属は(FCCでは)延展性をもっている。
- 「狸の金玉、八畳敷」というがこれは1匁(約4グラム)の金を畳8畳まで伸ばすのが金箔職人の作業標準とされたことから生じたことばだといわれる。

23

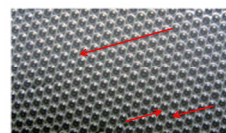
転位

ブラッグの泡モデル実験：転位研究における役割



(a) 最密充填状態の泡モデル

山口まり



(b) 転位の泡モデル



(c) 粒界の泡モデル

図1 泡の写真。泡のサイズ：直径1mm (著者作成)。

24

多結晶、結晶粒界

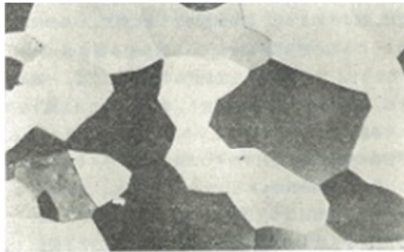
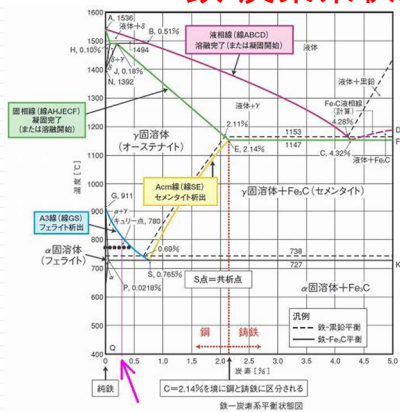


図 1-1 アルミニウム多結晶体の光学顕微鏡組織 (倍率×30)

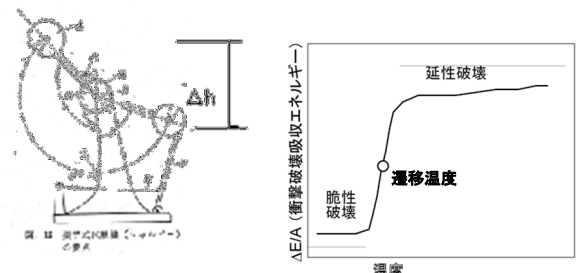
金属の(鉄鋼材料の)脆性破壊とは

鉄-炭素系状態図



- ・ふつ「鉄」と言っているのは、炭素を合金成分として含む鋼である。
- ・合金成分には、炭素だけでなく他の金属元素を添加することもある。
- ・低温では「鉄の相」はフェライトである。(bcc)

衝撃吸収エネルギー (脆性破壊と延性破壊)



$$\Delta E = mg\Delta h$$



延性破壊と脆性破壊は破面が違う

延性破壊—多数のあばた

脆性破壊—貝殻の内側

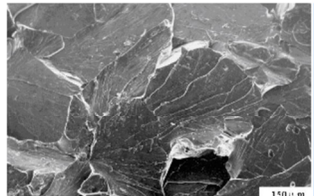
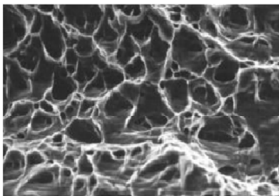


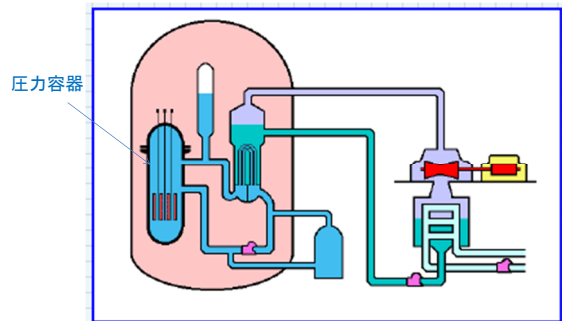
図4.7 リバーパターン(River pattern)

脆性破壊---深刻な事故を引き起こした例

- ・第2次大戦後、北極海を航海する貨物船をつくったところ、脆性破壊で真二つに割れた(旧ソ連)
- ・第2次大戦中から、造船はリベット打ちから溶接に変わってきた。溶接だと亀裂が伝播するので、この問題は深刻に受け止められた。

核物質閉じ込めでの圧力容器。
照射脆化と呼ばれる現象

加圧水型原子力発電所



原子炉圧力容器の材料と製造法

- ASTM A533(C-Mn-Mo(-Ni), A542(Cr-Mo), A543(Ni-Cr-Mo)などの低合金鋼を鍛造してつくる。
- 308型ステンレスを内貼りする。



原子炉圧力容器フランジ
(これに上下部分が付く)

なぜ鉄鋼材料か？

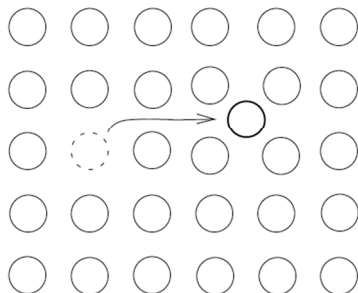
- 安価である。
- データがトラック何台分もある。
- 熱処理が効く。
- 機械加工性もよい。

主要相場	
日経商品指数17種 14日 124.868 (1970年平均=100) 前日比 +0.285	
貴金属地金 (東京、大口商業取引、持ち込み、現金、円、午後5時現在) ▼山元建値(円) 金(17mm) 64,630 銀(1mm) 169,680	鋼材 (関東神鋼、置き場積み込み、異形棒鋼は入荷口物と置き場大口商業取引、1トン、0.120日手形、千円) ▼地鋼 東京 大阪 大坂 異形棒10mm(S D 295 A) 54-56 53-54 異形棒16mm(S D 295 A) 59-62 49-50 平鋼 6 × 60mm 81-83 75-76 山形 6 × 60mm 66-67 67-68 みぞ形 5 × 60 × 100mm 67-68 68-69 日形 5.5 × 8 × 200 × 100mm 65-67 68-69 ▼棒鋼スポット物 (異形棒16mm、置き場渡し) 60-62 59-60
非鉄地金 (東京、商社出し値、置き場渡し、現物、1トン、現金、千円) 銅 0540-542 亜鉛 245-247 鉛 238-236 ずり(別日手形) ■2,105-2,115 ニッケル(商社出) ■1,200-1,220 アルミニウム(99.7%、輸入スポット物、120日手形) ■221-223	

2016/7/14の主要相場

圧力容器には中性子線が当たると正規の位置の原子を跳ね飛ばし「フレンケル対」という欠陥ができる。

フレンケル対 (空孔と格子間原子)



脆性出現のメカニズム

- 原子空孔と格子間原子はもう一度巡り合えば対消滅する。
- (もともと平衡状態でも空孔と格子間原子はある程度含まれているので) 欠陥の導入と消滅の過程は競合しながらおこり、長い間に点欠陥や格子間原子が合体して2次元・3次元のより大きな欠陥をつくる。
- このような欠陥は転位の運動を妨げ材料は硬くなり脆化する。
(複雑な過程であって成分・組織(貌)の影響を受ける)

照射脆化

- 「延性—脆性遷移温度は照射により一般に高温側にシフトし、一方、延性領域の吸収エネルギーである上部棚エネルギーは低下する。この問題はとく軽水炉型動力炉の圧力容器用鋼材の健全性にとって重要な問題であり、実際には圧力容器の脆化の程度を確認するために、原子炉の中にいわゆる監視試験片をいれて、時々取り出して調べることにより、安全性を確認しつつ運転がおこなわれている。」(『原子力材料』、日本金属学会、1989)

37

照射脆化—遷移温度が30°Cから100°Cにあがり、上部棚も低下している。

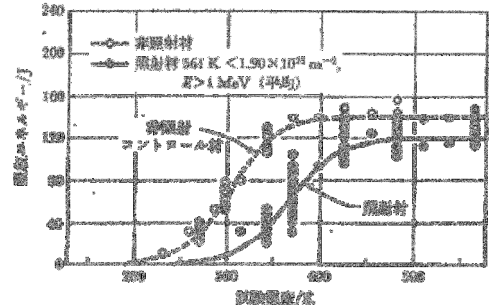


図2-22 原子力発電用鋼 A533 Class 1 照射のシャルピーVノッチ脆化試験データ (Suzgawa ら²⁴⁾による)

38

ポイント1—時間の関係する過程には相似則は成り立ちにくい

- 実機は20年、30年と使うことを予定しているが、実際の材料では20年間試験を続けることが困難なので、高負荷で「加速実験」を行い、それから得られたデータから類推することが行われていた。(いわゆる「予測式」)
- ところが、時間の関係する過程では「加速」で同等な結果を得ることが困難である。

卑近な例: ウィスキーモルト・泡盛の古酒の ageing, 熟成
人の成長、教育

39

ポイント2—実際に使われている材料は昔作った材料である。

- 制限つきで、それでも脆化を起こしにくい材料を開発することはある程度可能であろう。
- しかし、現存の原子力発電所で使われている材料は、20年前・30年前の「古い」材料である。(置き換えることはできない。)
- 結局、監視試験片で様子を見ながら運転していることになる。

40

脆化の予測モデル—脆化は予測できるか？

JEAC 4201-2004

- $\Delta RT = [CF] \cdot F_1(f)$
- $[CF] = -16 + 1210 \cdot P + 215 \cdot Cu + 77 \sqrt{Cu \cdot Ni}$
- $F_1(f) = f^{0.29 - 0.04 \log f}$

「国内BWR監視試験データには国内脆化予測式(上記の式)から大きく外れる異常照射脆化が見られる。」(井野博満、上澤千尋、伊東良徳:「国内沸騰水型原子炉圧力容器鋼材における照射脆化—監視試験データの解析—」、日本金属学会誌、第72巻、第4号(2008)261-267)

41

42

JEAC 4201-2007

- 電中研モデルに基づき、クラスター形成過程の反応速度論的考察を取り入れたもの。
- 監視試験片のデータに基づき、21個の未定係数のうち4個を手動で残りをメトロポリス法で最適化した。
- 「予測誤差の標準偏差は9.4°と10°を下回り」.....95%信頼区間で±20°の誤差がある。たとえば、70°だと予測したのが本当は90°だったりというような。

43

標準偏差とは

- データの散らばりを示す指標

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

- 正規分布モデルによると、標準偏差のプラス・マイナス2倍の範囲内に95パーセントのデータが存在する。3倍なら99.6パーセント

44

脆化の「実績」

45

「遷移温度」ワースト7

表2 原子炉圧力容器脆性遷移温度(ワースト7)

順位	ユニット名	型式	運転開始	分類	脆性遷移温度	中性子照射量	試験(取り出し)時期
1	玄海1号	PWR	1975.10.15	母材	98°C	7.0×10^{19} n/cm ²	2009年4月
2	高浜1号	PWR	1974.11.19	母材	95°C	5.6×10^{19} n/cm ²	2009年
3	美浜2号	PWR	1972.7.25	母材	86°C	4.4×10^{19} n/cm ²	2003年9月
4	美浜1号	PWR	1970.11.28	母材	74°C	3.0×10^{19} n/cm ²	2001年5月
				溶接金属	81°C	3.0×10^{19} n/cm ²	2001年5月
5	大飯2号	PWR	1979.12.5	母材	70°C	4.7×10^{19} n/cm ²	2000年3月
6	敦賀1号	BWR	1970.3.14	母材	51°C	0.094×10^{19} n/cm ²	2003年6月
				溶接金属	43°C		
7	福島第一1号	BWR	1971.3.26	母材	50°C	0.09×10^{19} n/cm ²	1999年8月

(出典：原子力資料情報室上澤千尋作成の「原子炉圧力容器鋼材の監視試験結果一覧」ほか)

井野博満:「金属」Vol. 83(2013), No.3, 343-350

46

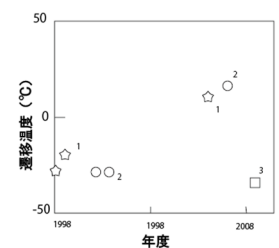
2006年の吉井議員の質問

- そこで、最初に政府参考人の方に伺っておきますが、もろくなる状況を示すこの脆性遷移温度が、これはどんどん温度が上がっていった、美浜一号ですと七十四度C、美浜二号で七十八度C、高浜一号で八十八度C、大飯二号で七十度C、玄海一号で五十八度Cというふうになっていますけれども

47

泊原子力発電所

泊原子力発電所の監視試験片の遷移温度の変化	
1号機(平成元年[1988年]6月営業運転開始)	
監視試験片の取り出し時期	関連温度(遷移温度)
初期値	-30°C
第1回	平成2年5月 -20°C
第2回	平成16年8月 10°C
2号機(平成3年[1991年]4月営業運転開始)	
監視試験片の取り出し時期	関連温度(遷移温度)
初期値	-30°C
第1回	平成4年5月 -30°C
第2回	平成18年11月 16°C
3号機(平成21年[2008年]12月営業運転開始)	
監視試験片の取り出し時期	関連温度(遷移温度)
初期値	-35°C



訂正:左端の数字
1998→1988

48

圧力容器脆性破壊のシナリオ

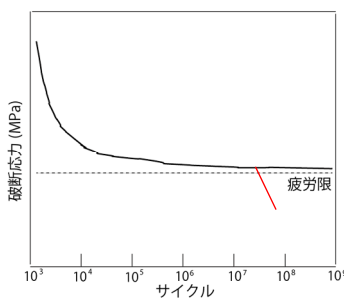
- ECCSが作動した際、圧力容器が急冷され熱衝撃によって破壊される。
- 原子炉緊急停止のあと、(熊本地震のように)前震よりあとに本震が襲いその時には圧力容器は冷えているので遷移温度以下となっていてその衝撃で破壊される。

49

疲労

50

金属材料は降伏応力以下でも(弾性域でも)繰り返し応力で破断する



この現象を「疲労」という。金属結晶が完全結晶ではなく、転位などの欠陥を含んでいることから起こるとされている。有名な事故が「コメット機」の空中分解。原子力発電所の(特に)配管系は繰り返し応力を受けるのでこの現象も心配しなければならない。(超高サイクル疲労)最初の方に出てきたエレベータのワイヤ・ロープでは「疲労」による破断を避けるため、定期点検の際にロープを交換している。

51

エロージョン(美浜原発の例)

52

エロージョンとは？

- 船のプロペラ(スクリュー)は水の中で回転しているので負圧によって泡ができる。この泡が破裂すると材料にダメージを与える。
- FCCでは耐エロージョン性が高いとされるので船のプロペラはふつう銅合金でつくる。鉄合金の場合はオーステナイト系ステンレス(FCC)を使う。

53

配管の減肉(美浜原発)

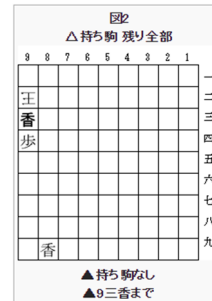
- 美浜原発事故では、配管にステンレスではなく炭素鋼系の鋼を使っていたので、(口径の変動部で)エロージョンが生じ、減肉してパイプから水蒸気が噴出し、死者をだした。
- 配管の破断は冷却水喪失につながるおそれがある。

54

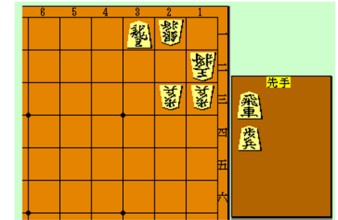
「詰み」で勝負が終わるか
「必至」なら終わりか？

55

将棋---「必至」を掛けられたら 投了する



詰み



必至

56

新基準、高浜原発の稼働延長

57

「新規制基準(設計基準)」

3. 原子炉施設における個別の系統 (3) 原子炉冷却材圧力バウンダリ

【基本的要求事項】

3 原子炉冷却材圧力バウンダリは、通常運転時、補修時、試験時、運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故において、脆性的挙動を示さず、かつ、急速な伝播型破断を生じない設計であること。

原子炉冷却材圧力バウンダリとは(a) 圧力容器及びその付属物、(b) 冷却材系を構成する機器及び配管、(c) 接続配管をいう。

58

高浜原発の稼働延長

- 高浜1号炉はもともと玄海1号炉について2番目に脆化が進んでいる。
- 脆化予測式によると60年後はさらに脆化が進む。
- 試験片の数は足りるのか？

59

- 質問

60