

技術と人間

1992 MAY

5

特集
美浜2号炉事故を解明する

美浜事故の今日的意味

小林圭二

ECCSは有効に作動したか

海老沢徹

細管の疲労破断はなぜ起きたのか

正脇謙次

放出放射能を検証する

小出裕章

新段階を迎えた新石垣空港

山里節子

現代シンクタンク論

土方智

放射能汚染と被災者たち

今中哲二

細管の疲労破断の解析と問題点

正脇謙次

設計思想とその矛盾点

今日、原子炉機器の設計における基本概念は、CRACK SAFEとFAILSAFEである。前者では部材に欠陥の内在を許容し、それが限界欠陥に成長するまで追跡して構造物を安全に保つように、後者では部材が破損しても構造物全体の安全を保つように設計する。いわゆる、損傷防止設計ではなく、

損傷許容設計の考え方方が主体となっている。このような考え方のもとで設計、製作された機器を長期間安全に稼働させるためには、各部の機能を常に点検することが課せられた条件であり、すばんな検査は許されない。運営に重点をおいた設

計思想の導入は、機器の稼働効率を高めるという経済的理由以外のなものでもない。細管破断事故の解析に関する資源エネルギー庁発行の報告書（以後、報告書と略称）に一貫して流れる思想、即ち、疲労亀裂を含む部材の損傷をECTにより定期検査で必ず検出できるとしたり、またたとえ破損しても他の安全装置が作動するので、全体として構造物の安全は保たれるという姿勢は、まさに上述の概念の導入を物語っている。

一方、事故解析に用いられた破壊力学と称されるものは、このような概念と表裏一体の関係にあり、内在する欠陥について、計算で予想されるパラメータK_I（応力拡大係数と称する）が実験的に求めたバラメータK_C（破壊非性値と称す

る)に等しくなければ($KI = KC$)、破壊すると仮定する。すなわち、 $KI = KC$ の範囲内で亀裂の進展を許容し、部材の安全性を保証するのである。重要な点は、力学的に全く同じ条件設定でなければならないことである。実験室でならともかくも、実際に使用される環境が、計算で予想された環境と同じである保証はないことである。このようなときふたつの値の比較は安全を保持する上では、無意味なものである。物性論を主体とする材料強度学は、周辺環境を考慮して破壊機構を解明する目的のもので、これを微視的に取扱う破壊力学とすれば、破壊力学は、いわば設計を目的とした巨視的破壊力学である。したがって、いずれの立場をとるかにより、破壊原因の究明過程に違いが必然的に生じる。

原発で義務付けられている定期検査と称される作業が前述の点検に相当するが、いま、検査の対象を細管に限定すると、その主体はECTと呼ばれる、渦電流探傷法による欠陥の非破壊的な検出法にある。今回の細管破断の原因とされる金属疲労亀裂の発生は、無論のこと、亀裂が長期間かけて緩やかに拡大する伝播過程ですら、この点検作業で検出されなかつた点に重要な意味がある。つまり、破断後、過去のデータを再検査してやっと見つけたというノイズレベルの信号では、破壊すれば大事故につながる機器を長期間安全に保つ上で全く役に立たない検査法であることが確認されたわけである。この事実と、更に蒸気逃し弁が作動しなかつたという事実に

注目すれば、結局、課せられた条件を満たしていないシステムにFAULT SAFEやCRACK SAFEという設計概念のもとで製造された構造物の安全性を委ねているという現状において、如何にして安全に稼働することができるのか理解したい。

安全専門審議会の報告書において、ECTの高度化を図るとか、新たな検査法を開発するとかの提案がなされているが、本当に実現可能なのかどうか、具体的にその方法を提示することなく言葉だけでは、空しいものである。正確に損傷を検出する手法が確立された上で、設計にCRACK SAFEやFAULT SAFEの思想が反映されるべきものである。これでは本末転倒であるといわざるをえない。

なお、最近のNRCレポートによれば、ECTにより検出されない粒界亀裂が存在することを指摘している。

細管の疲労設計について

金属疲労により破断したとされる細管(電熱管と称する)は、蒸気発生器の内部に設置された数千本の内の一本である。その機能は一次側(管内部)から二次側(管外部)に熱を伝えるという単純であるが、その設計にさいしては、熱の損失をできるだけ少なくして、一次側から二次側に効率よく熱を伝えるという条件を課せられる。それゆえ、管の肉厚を可能

な限り薄くすることが最も重要な課題となる。可能な限りと
いうのは、管の強度が内圧（約一六〇 kg/cm²）、外圧（約七
〇 kg/cm²）に耐える十分な強度を有すること、更に腐食に耐
えるという制限が加わるためである。このように、熱効率を
高めるという条件は材料強度面等から規制される。設計の際
には、熱効率あるいは安全性かのいずれをおくかは、
その部材が破損したときの重要性をいかに認識するかにより
決まるが、原子炉の破壊という最も危険な状態を想定すれば、
当然、熱効率より安全性に重点をおいた設計となるはずであ
る。

設計段階で、疲労破壊を想定したという事実は残念ながら
報告書にはみられない。これは疲労破壊を重要視していない
からである。それはかつて、細管が疲労破断したという事実
がないことと、PWR（加圧水型原子炉）における蒸気発生
器の細管に多発している損傷の多くが、腐食孔や応力腐食と
いった腐食環境に依存したもので占められているからで、そ
れに対処するために、高温強度より耐食性に重点をおいた材
料選択となっている事実がこれを物語る。ちなみにインコ
ネル六〇〇という素材はニッケルを主成分とし、低炭素量
(○・○・%以下)で耐食性が優れた合金として開発された。
このように、設計に際しては腐食に対していかに腐心してい
るか認識される。ところが、一九八七年に米国バージニア電
力ノース・アンダ1号炉で細管が高サイクル疲労により破断

するという事故が起きたのである。これは予想外の出来事で
あり、本来ならば、この時点では美浜2号炉のシステム全体を
十分に時間をかけて再検討すべきなのだが、多分、振れ止め
金具の設置、高度な水質管理、ECTで亀裂の検出が可能
等の認識から、同様の疲労破壊なぞが国では起きるはずが
ないと考えて、なんらの処置も講ぜず、事故当日まで稼働し
てきたのが実情であろう。細管の設計に疲労強度を考慮して
いないにもかかわらずである。

事故解析

1 流力弹性振動の検討

細管の疲労破断事故として、前述のノース・アンダ1号炉
で最初に起きたが、破断面の電子顕微鏡による観察からスト
ライエーションを認め、高サイクル疲労であると結論している。
ウエスチングハウス社による事故解析では、細管に作用した
繰り返し負荷の解析にFluidelastic mechanismを想定して、
コンピュータプログラム(FLOWIB)により細管周辺の流れ
と細管の振動を解析している。この力学的基本的考え方は、細
管列の隙間を流れる二層流(蒸気)および乱流という条件設
定のもとで、流れから受ける力による弾性体(細管)の振動
計算であり、平均流速 v が臨界流速 v_c に近付くと振動が

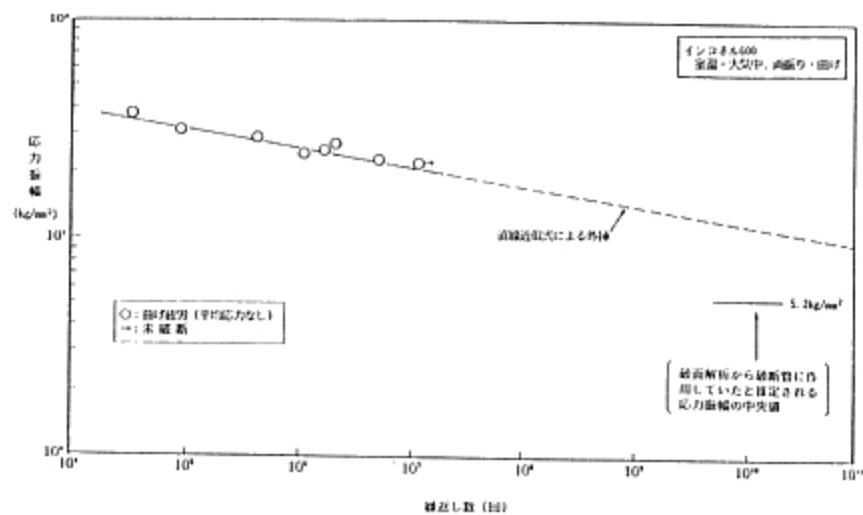


図1 細管の疲労試験の結果⁽¹⁾

不安定になると、いうコナーらの提案した条件式にみられる。パラメータとして両流速の比 β_1/β_2 を安定比と称し、一・〇を越すと不安定振動が起きるとして、この値を評価し、異常振動を疲労破壊の原因の一つに挙げている。つまり、細管が固定され、疲労

破壊したという状況が、ノース・アンナ1号炉の事故と酷似していることから、数値計算プログラムは同じかどうかは分からぬが、美浜2号原発の事故解析も同様の条件式を用いて

解析し、流力弹性振動が疲労破壊の原因として、いち早く中間報告書で用いられたわけである。既に、事故原因としてのシナリオがノース・アンナ1号炉に関する報告書等からできあがっていたことになる。

報告書によると、たとえ管が鋸で支持板に固定されても、支持金具さえあれば、自由端がピン支持になり、細管の固有振動数が高くなるので（臨界値が高くなる）、安定比は低くなり、振動による負荷が低下するので、疲労破壊は起きないという主張である。一見妥当かのようと思われるが、実は、計算に用いられる方程式には実験により決めなければならぬ重要なパラメータをいくつも含み、二層流（蒸気）、乱流という条件設定と、多数の細管とそれを支える支持板や金具等の構造を考えると、流れは非常に複雑になり、このような問題に平均流速等に正解が期待されないのは当然である。既に、安定比なるものはパラメータの設定次第で著しく変化することをNRC報告書でも指摘されている。したがって、安定比による評価は参考資料となるかもしれないが、決定的なものではないのである。これは当然、安全専門審議会報告書でも指摘している。結局、細管の疲労破壊が異常振動によるのかどうか定かではない。ただし、流力弹性振動を、単に

細管が流体から受ける力による弾性体の振動とするならば納得できよう。

2 疲労設計からの検討

美浜2号炉の設計段階では、前述の振動解析法は存在しなかつたのは事実である。負荷の大きさを予想できない状況で、正確な疲労設計などできないのだから、当時としては、支持金具の有無など重要な問題ではなかったはずである。米国のTEMAの基準(熱交換器の設計基準)を満たしていれば、たとえ、細管が支持板の鋸で拘束されても(支持板が炭素鋼で製作されているから当初から鋸の発生は予想されたものである)、小さな負荷であるから、疲労破壊が起きようなどはない。夢にも思わなかつただろうし、腐食による損傷は定期検査(E.C.T.)で検出できるから安全であると考えたのであろう。事実、当時の設計資料については報告書には、前述したように、なに一つ記載されていない。

疲労亀裂検出のためにE.C.T.を選択したこと、すなわち、今回の事故は疲労設計が行なわれたかどうかより、検査法に間違いがあつたことを明白に物語っている。

今回の細管破断は、高サイクル疲労でしかも、10⁶回もの繰り返し数の低負荷による破断だという。なお、高サイクル疲労とは破壊まで10⁶回以上の繰り返し数が必要な疲労破壊をさす。金属疲労とは、降伏応力(除荷しても形が元に戻ら

ない応力で、普通、変形が〇・二%となる値を採用する。ちなみに、当該管は室温では三〇~三二kg/mmとされている。に比べて十分小さい負荷を繰り返し作用させると、遂には金属が破壊するという現象であつて、破壊したときの回数を疲労寿命と定義する。大きな負荷を作用させれば、早く破壊する傾向にある。つまり寿命が短くなるわけだが、10⁶~10⁷回繰り返しても破壊しない負荷を疲労強度と呼び、疲労設計の基準値としている。この値は、インコネル六〇〇では国1から二〇数kg/mmとなつてることが分かる。通常、この値以下の負荷を作用させても疲労破壊は起きず、安全であるとするわけだから、10⁶回での疲労破壊は、設計上なんら問題にならないほどの疲労寿命なのである。つまり、予期されない出来事なのである。実は、時間的制約により便宜上、疲労設計のために0~10⁶回を設定したに過ぎず、10⁶回までの長期間疲労試験したデータは皆無で、設計上、低負荷では破壊しないと見なしただけである。長期間稼働する機器ならば当然、疲労破壊は見込まなければならぬ性質のものであり、今回の事故は特別、不思議な現象ではないことに留意すべきである。実験事実に基づき、疲労設計を行なうわけであるから、長期間稼働させる場合には、それに見合つただけの実験(今回は一〇万時間)を行なわなければならないのである。

したがつて、この状況のもとで疲労設計できるのは、十分な安全率を見込み、稼働期間中に点検で、亀裂の有無を正確に

把握できる状態にある場合に限られるであろう。このように、長期間使用の細管としては、疲労設計として十分な配慮がなされたとは思えない。

3 フレンチング疲労の検討

細管が疲労破断したという証拠として、いち早く公表された資料は、電子顕微鏡により観察された破面の写真である（「フラクトグラフ」という）。高サイクル疲労破壊の特徴であるストライエーションが観察されたことから判断したという。

ところが、観察箇所が管の中立面付近であり、亀裂が管壁を既に貫通した伝播の途中段階であった。これは初期に疲労亀裂が形成される領域（管は曲げ変形では最外部）ではなく、既に断面を通過した点である。すなわち、亀裂が長期にわたり徐々に伝播した破面ではなく、急速に伝播した領域である。核生成（亀裂発生の起点）の破面は、最終報告書まで公表されなかつたのは、破面の特徴が今までに知られているものと、非常に異なるものであることを暗示していた。一〇万時間におよぶ疲労破壊などのデータがそろ多くあるわけがないからである。

報告書では、特徴はモザイク模様であるとして公表され、同時にフレーチング疲労で生じるのと同じ特徴をもつので、今回の疲労はフレーチング疲労だという。それでは、フレーチング疲労でない低ひずみの疲労破面はどのような特徴をも

つか、その違いについての検討が全く欠けているのである。ノース・アンナ1号炉の場合は、ストライエーションは少なくとも亀裂が貫通する以前に、起点とされる近くに形成されたという事実がある。ただし、破面に滑らかな領域も確認されている。素材がインコネル六〇〇という同じ組成の金属でも、製造工程や熱処理の微妙な違いが変形過程には現れるので、同じ程度の負荷でも疲労寿命は同じになるという保証はないが、ほぼ同じ破壊機構である点は認めてよいだろう。

公表の遅れた理由は、破面が脆性破壊の特徴をもつのではないかという点であり（ノース・アンナ1号炉の細管破断部の一部に粒界破壊を確認している）、検討に十分時間をかけたためであろう。もっとも恐れられたのは、それが突然的に起きる現象であつて、ECTで予知が不可能であるから、定期検査が意味をもたなくなる点であろう。それゆえに、この領域が長時間経過して伝播した証拠として、破面における酸化膜の形成を指摘している。一部の金属を除き、大多数は短時間で酸化する。インコネル六〇〇が耐食性が大きいという理由で、酸化膜の形成までに時間が経過したということを主張し、この点から脆性破壊を否定したに違いない。

ノース・アンナ1号炉も、同様に鋸で細管が固定して、しかも、より大きな拘束力を受けて疲労破壊したという過程を経たのに、拘束力が小さい美浜2号炉の細管に擦り傷が生じ、一方、ノース・アンナ1号炉に擦り傷がない等の現象は普通

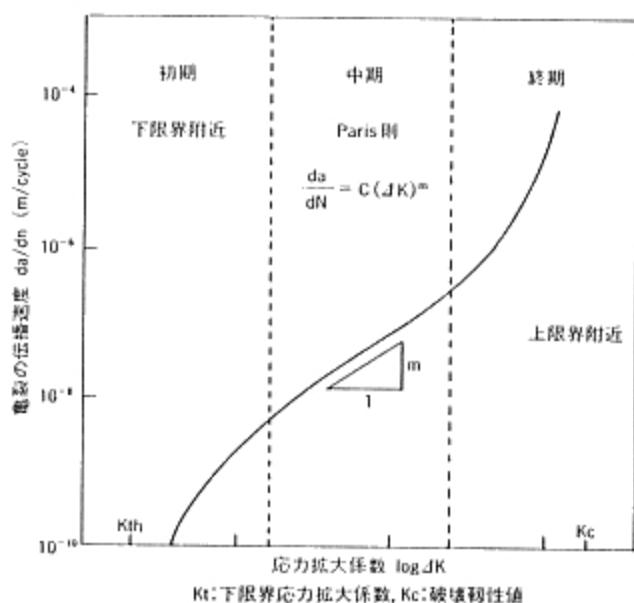


図2 亀裂の伝播速度と応力拡大係数の関係

に考えても不自然である。むしろ、観察される程度の擦り傷はノース・アンナ1号炉でも形成されていたが、問題として取り上げなかつただけのことはないかと推察される。なお、ノース・アンナ1号炉でも破面で酸化とフレッチングが観察されたと報告しているが、報告書の意味するフレッチングとは全く異なつておらず、力学的な解釈を行なつていらない点に注

目すべきである。

これほど擦り傷にこだわる理由は、破壊力学によって亀裂の伝播を解析するためには、初期亀裂（ノッチ）の存在が必要条件であつて、それをあえて微細な擦り傷に求めたと考える以外はない。すなわち、破壊力学は亀裂の伝播過程を解析するためのもので、亀裂の発生を取り扱う核生成理論ではないのである。平坦な面では応力拡大係数 ΔK が評価されないから、疲労亀裂の伝播過程の解析が不可能なのである。すなわち、亀裂が既に存在して、鋭い亀裂の先端に生じる集中応力により、 ΔK が評価されるからである。このような微細な擦り傷を切り欠き（ノッチ）とみなして、巨視的力学により取り扱うのは正当な方法ではない。なぜ亀裂の核生成理論を用いて、真正面から取り組まないのか。その理由は、解析には単なる負荷だけでなく、温度、変形速度、雰囲気等を影響因子として定式化する必要があり、それを自ら構築しなければならないという難しさのためである。

ちなみに、図2は疲労亀裂の伝播速度と応力拡大係数 ΔK 、破壊革性 K_c の関係を模式的に示したもので、疲労破壊における応力拡大係数 ΔK と亀裂伝播速度 da/dN (a : 亀裂の長さ, N : 繰り返し数) の関係が線図の特徴から三つの領域に分けられている。初期領域には、ほとんど亀裂が進展しないとみなせる値 ΔK_{th} が定義され、中間領域は、一般にparis則とよばれる関係が成り立つ領域で、両対数座標上で

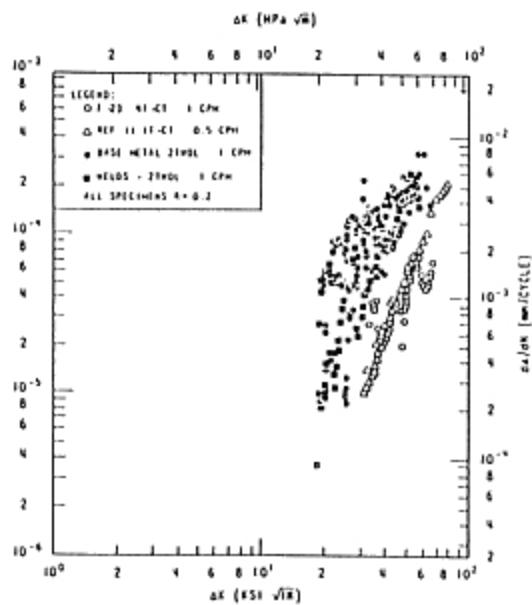


図3 圧力容器に用いられる鋼の疲労亀裂の成長⁽⁷⁾

一般に、破壊力学では取り扱えないとされている。すなわち、平滑面から疲労亀裂とみなせる巨視的サイズに成長するまでは力学的適用外なのである。

図3は原子炉(PWR)の圧力容器に使用される鋼材の疲労試験結果の一例である。実験条件は、明らかに中間領域を想定したことが理解されるであろう。これは特殊な条件ではなく、一般に、疲労試験はこのような条件設定でおこなわれ初期領域の条件設定で実験が行なわれる場合は極めてまれなことである。すなわち、疲労亀裂に発達する過程に長時間費やされることと、その挙動が複雑で、力学的取扱いが不明なため、実験はほとんど行なわれないという事情がある。これが低負荷で長期間の疲労試験を阻害していることの一つの理由である。

破壊力学を適用するきっかけをつくるために、報告書ではわざわざ実験を行なっている。すなわち、破壊機構の解析においても、破壊力学に執着するのは、前述の思想と密接な係わりがあることが認識される。

細管のように、試料の表面が平坦で、しかも低負荷という条件は、国では初期領域に位置する。ここでは、試料の熱処理、加工履歴の影響や疲労の環境の影響がもともと著しく伝播速度にあらわれ、破面には内部組織に対応した特徴が観察される場合が多いという特徴をもつ。

本来、フレッチング疲労とは、擦り傷をノッチとみなすのではなく、力学的にみて負荷が低いにもかかわらず、高圧、高温蒸気中の原子と金属元素との化学的反応や電気化学的反応によって、疲労亀裂が発生して破壊する現象を指し、いわなれば、物性論で取り扱うべき性格のものである。力学的に擦り傷をノッチとして取り扱う性格の疲労ではない。フレッ

チング疲労に原因があるとするならば、当然、腐食環境と材料の反応に重点をおいた解析になるはずである。報告書には、腐食と疲労あるいは変形の関係を真正面から取り組む努力が全く認められない。水素、酸素等の格子間型侵入元素の影響に対する記述や放射線損傷に関する記述もまたしかり、文献調査という簡単な言語で終始している。水素や酸素等の格子間型侵入元素は結晶を簡単に通過して残留しないかのように記載しているが、元素を補促する場所としては、表面、粒界、析出物と母地との境界、他の格子欠陥など多数存在することを考えれば、到底、簡単に結論は出せるものではない。破面が酸化膜で被われているという事実は、単に破面が酸化したとしてとらえるのではなく、亀裂の先端部で酸素が高濃度となることや、インコネル六〇〇では高温水中で酸素による応力腐食として知られている破壊現象が起きることも参考にして、今回の破壊との関連性を重要視すべきである。更に、熱処理による組織の鋭敏化、例えば、加工後の残留応力を除くための熱処理や溶接時の加熱により組織は鋭敏化し、耐食性を著しく低下させるという現象もある。このように、破壊力学以外に、違った立場からは大切な考察事項が多数ある。いまままで、材料科学に重点をおいた細管損傷の検討を重視しなかつたか、あるいはそれが欠如していたために、腐食にかかる多くの問題が未解決のまま今まで残されたと言つても過言ではないだろう。この意味から、未公表となっている残

留応力の測定、水質検査、破面付近の微細組織の観察、破面の元素分析、腐食電位の測定等の資料の重要性を認識すべきである。

4 細管固定の意味するもの

低負荷で細管が疲労破断した理由の一つに銷による細管の固定がある。銷の締め付けにより細管に作用する拘束力を、ノース・アンバー1号炉では、これを塑性変形が見られる程度の負荷としてデンディングと表現しているが、美浜2号炉ではデンディングは起きていないという。これは、単に負荷の大きさの違いであり、破断機構上の本質的な違いではない。報告書では、締め付け力をパラメータにして疲労実験を実施しているのであるが、拘束力を逆に予想するという手法は、実際の現象を正確に把握して、それを実験に反映できなければ意味のないデータとなる。変形環境がどのようにあるかは、記述がないので評価値に対し論評できない。

結晶の破壊は脆性破壊を除き、塑性変形（除荷しても、形が元に戻らない変形）をするのが前提条件である。細管の固定部においては、軸方向には、振動によって引張り力と圧縮力が交互に作用し、さらに、締め付けにより細管の円周方向に負荷が作用したときには塑性変形が生じ易くなる。これを力学的に説明するために、簡単な降伏条件、例えば二方向の応力差（軸方向の応力 σ_x と円周方向の応力 σ_y ）が一

定値になつたときに塑性変形が起きたとする条件を用いると
〔正へ一九へ一九〕、〔正へ一定数〕、円周方向の応力は常に圧縮応
力（負の値）であるから、管が曲げられた状態で、引張り
応力（正の値）が生じる外側では、右辺の値は両応力の和
（一九へ十九）となる。換言すれば、拘束力が作用すると、
曲げによる応力が低くても塑性変形するのである。すなわち、
蒸気の流れによって生じる振動負荷を一定とすれば、細管は、
固定され、拘束力が次第に大きくなるにつれて塑性変形しや
すくなる。これは疲労変形時には、ひずみ振幅が大きくなる
ことを意味するので、拘束力が作用しない場合に比べて疲労
寿命が短くなる。拘束力以外に、更に、管内の流れから受け
る引張り応力、ねじりによるせん断応力等を考慮すれば、
これらは変形を抑止する方向に作用するのではなく、助長す
る方向に作用するので、疲労寿命は更に短くなる。

報告書の平均応力の評価に、いかなる設定条件を用いたか
は定かではないが、破断場所を特定すれば、拘束力の値とと
もにその分布も大切な条件になる。いずれにしても、流力彈
性振動による大きな負荷を予想せずとも、これらの多軸応力
の作用を考えれば、固定域では、低負荷で塑性変形が生じる
ことは間違いない。しかし、現実に疲労時に細管に生じ
る応力とひずみを弹性力学の計算で簡単に評価できるもので
はない。

約三〇〇°Cの蒸気という雰囲気で一〇万時間という疲労環

境を考慮すれば、細管の機械的性質や耐食性は劣化すること
はあっても、よくなるとは考え難いから、フレッチング疲労
と仮定すると、低応力で疲労破壊してなんら不思議ではな
い。ノース・アンナ1号原発では、破面に粒界亀裂を認めて
いるが、これは腐食環境が疲労破壊に作用する腐食疲労であ
る可能性を示唆している。粒界が応力集中源としての役割を
果たし、粒界破壊を起こす応力腐食として知られる機構と、
本質的には違ひがない。単に負荷が交互に繰り返されるか、
静的に作用するかだけの違いである。応力腐食は美浜2号炉
のみならず多数の原発で細管損傷として確認されている現象
でもある。以上の点から、力学的には流力弹性振動による大
きな負荷が作用したとするよりも、銷による細管の締め付け
による拘束力の作用が主原因となり、更に、フレッチング疲
労を起す腐食環境（高温、高圧水等）が同時に作用したた
めに、低負荷で疲労破壊したと考えるのが妥当であろう。
細管疲労の主原因是、支持板の銷による細管の拘束から生
じる負荷を無視したか、あるいは低く見積もつたかのどちら
かで、結局耐用年数に対処した疲労設計が細管に対して行な
われていなかつたことにある。換言すれば設計時に、低負荷
で100回という大きな繰り返し数で疲労破壊が起きるという
認識はなかつたことである。そして、ECTへの過大な信頼
が細管破断を防げなかつた理由である。これはまた、経済的
効率に重点をおき、機器の安全性を犠牲にするという姿勢に

おおきな問題があることを物語る。疲労破壊は起きる。*ある*のとして、常に対処できるシステムがない限り、原発を長期

間安全に運転することは困難である。安全性を、唯一の検査法であるECTに委ねた現状では、非常に危険である。われに、事故解析について感じたことは、設計者として狭い認識、すなわち、破壊機構の解析においても巨視的破壊力学にこだわるような姿勢では、物事の本質を見逃すのではないかといふ点であり、今日、多発している細管損傷の解決には、材料科学による事故解析の必要性を痛感した。低負荷で10¹⁰回という疲労破壊が起きるとする事実を、他の分野において、長期間稼働する機器の設計時には、教訓として生かすべきであろう。

(しょうわき けんじ、京都大学工学部機械工学教室)

参考文献

- (1) 「関西電力(株)美浜発電所2号機蒸気発生器電熱管損傷事象について」資源エネルギー庁、平成3年1月
- (2) 「関西電力(株)美浜発電所2号機蒸気発生器電熱管損傷について」原子炉安全専門審議会、電熱管損傷ワーキンググループ、平成4年3月
- (3) PROBLEMS WITH THE RELIABLE DETECTION OF INTERGRANULAR ATTACK(IGA) OF STEAM GENERATOR TUBING, NRC INFORMATION NOT-

ICE 91-67, OCTOBER 21, 1991.

(4) 「事故報告書」の欺瞞を衝く 小林圭一 本誌本号

(5) NONPROPRIETARY SAFETY EVALUATION BY THE OFFICE OF NUCLEAR REACTOR REGULATION, NORTH ANNA POWER STATION, UNIT 1, DOCKET NO.50-338, DECEMBER 11, 1987.

(6) 例えば、FLUIDELASTIC VIBRATION HEAT EXCHANGER TUBE ARRAYS, H.J. CONNORS, ASME J. MECH. DESIGN, 100-347, 1978.

(7) SOME MECHANISTIC OBSERVATION ON THE CRACK GROWTH CHARACTERISTICS OF PRESSURIZED VESSEL AND PIPING STEELS IN PWR ENVIRONMENT, W.H.BANFORD ABD D.M.MOON, CORROSION-NACE, 36-289, 1980.

(8) 鋼管のCREVICE CORROSION ALLOY 600 IN HIGH TEMPERATURE AQUEOUS ENVIRONMENTS, D. TAYLOR, CORROSION, NACE, 1979

(9) 発電所の運転・建設年報(平成2年度)、福井県原子力環境安全管理協議会、技術部会、平成3年10月