

高延性材から脆性材までを対象とした 構造健全性確保のための体系的な考え方

A Systematic Concept of Assuring Structural Integrity of Components and Parts
for Applying to Highly Ductile Materials through Brittle Materials

鈴木 一彦

Kazuhiko SUZUKI

原子力基礎工学研究部門

耐照射性原子力材料開発グループ

Research Group for Irradiation Field Materials Science
Nuclear Science and Engineering Directorate

September 2007

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

*〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

高延性材から脆性材までを対象とした構造健全性確保のための体系的な考え方

日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究部門燃料・材料工学ユニット

鈴木 一彦

(2007 年 6 月 20 日受理)

プラント機器の構造健全性確保の考え方は、材料特性を高延性あるいは脆性に限定して開発されてきた。しかしながら、使用条件がますます苛酷になってきている結果、当初は高延性であっても使用中に延性低下してしまうといったことが起き始めている。また、高強度ではあるが延性が十分には高くない高強度鋼などが使われ始めている。この結果、これまでのように材料特性を限定して、あるいは、材料特性が当初からは大きく変化しないことを前提として健全性確保を考えていては、技術革新に対応しきれなくなっている。高延性材から脆性材までを体系的に考えることが重要になってきている。

このため、構造健全性確保について材料特性を限定しないで、かつ、体系的に考えるとはどのように考えることか考察し、具体的な姿を提案することを目指している。本レポートでは、最初に、これまでの高延性材機器の規格及び脆性材部品に対する考え方を分析し、背景にある考え方を明らかにした。次に、これらのことを参考にして、まず、脆性材部品に対する現状の考え方の課題を明らかにし、解決策を提言した。そして、体系化の考え方を考察しつつ、中間的な延性を有する場合、あるいは、経年変化により延性低下した場合に適用する健全性確保の考え方を提案した。

主要な提案は次の通り。

- (1) 構造健全性確保の基本思想
- (2) 構造物としての抵抗を定めるための限界パラメータとしては、限界に至るプロセスを制御できるものの中で最大のパラメータとする。
- (3) 延性破壊から脆性破壊を体系的に取り扱うため、破壊の形態を、塑性変形誘起型の破壊と存在する欠陥が誘起する破壊として改めて分類することを提案した。
- (4) 想定する破損モードについて、体系的な分類を提案した。
- (5) 塑性変形誘起型の破壊（いわゆる延性破壊）を防止する考え方について、特に曲げモーメント負荷時の変形と破壊を考察し、延性が低下した場合にも適用できる体系的な考え方を提案した。
- (6) ラチェット制限などや設計裕度（安全裕度）などの考え方についても体系化の観点から提案した。

A Systematic Concept of Assuring Structural Integrity of Components and Parts for Applying to Highly Ductile Materials through Brittle Materials

Kazuhiko SUZUKI

Division of Fuels and Materials Engineering
Nuclear Science and Engineering Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received June 20, 2007)

Concepts of assuring structural integrity of plant components have been developed under limited conditions of either highly ductile or brittle materials. There are some cases where operation in more and more severe conditions causes a significant reduction in ductility for materials with a high ductility before service. Use of high strength steels with relatively reduced ductility is increasing as industry applications. Current concepts of structural integrity assurance under the limited conditions of material properties or on the requirement of no significant changes in material properties even after long service will fail to incorporate expected technological innovations. A systematic concept of assuring the structural integrity should be developed for applying to highly ductile materials through brittle materials.

Objectives of the on-going research are to propose a detail of the systematic concept by considering how we can develop the concept without restricting materials and for systematic considerations on a broad range of material properties from highly ductile materials through brittle materials.

First, background of concepts of existing structural codes for components of highly ductile materials or for structural parts of brittle materials are discussed. Next, issues of existing code for parts of brittle materials are identified, and then resolutions to the issues are proposed. Based on the above-mentioned discussions and proposals, a systematic concept is proposed for application to components with reduced ductility materials and for applying to components of materials with significantly changing material properties due to long service.

Keywords: Structural Integrity, Systematic Concept, Ductile Materials, Brittle Materials, Reduced Ductility Materials, Fracture, Failure Modes, Design Concept

目 次

1. まえがき	1
2. 高延性材を用いた機器の規格における健全性確保の考え方の分析	3
2.1 機械的性質	3
2.2 破損モード	5
2.3 破損防止の基本的な考え方	6
2.4 設計裕度の考え方	9
3. 脆性材を用いた部品の考え方について分析と提案	13
3.1 機械的性質	14
3.2 破損モード	16
3.3 既存の脆性材部品に対する規格の分析	18
3.4 構造健全性確保の考え方についての考察	21
3.4.1 現行規格の課題	21
3.4.2 考察	22
3.5 構造健全性確保の考え方についての提案	28
3.5.1 欠陥の存在を前提とした既存の構造規格、及び脆性材の欠陥検出	28
3.5.2 脆性材部品の構造健全性確保の方法についてあるべき姿の提案	29
4. 中間的な延性材機器の健全性確保の考え方、並びに、体系化についての考察	38
4.1 体系的に考えることの必要性	38
4.2 中間延性材の機械的性質についての考察	40
4.2.1 破壊	40
4.2.2 変形	46
4.3 構造健全性確保の基本思想	54
4.4 構造健全性確保の考え方の提案	60
4.4.1 構造規格の体系	60
4.4.2 考慮すべき技術工程	60
4.4.3 材料について	61
4.4.4 設計について	65
5. あとがき及び今後の展開について	89
謝辞	91
参考文献	92

Contents

1. Foreword	1
2. Review of concepts of structural integrity assurance for components with high ductility materials	3
2.1 Mechanical property	3
2.2 Failure modes	5
2.3 Basic concepts of failure prevention	6
2.4 Design margin	9
3. Review and proposal of concepts for parts with brittle materials	13
3.1 Mechanical property	14
3.2 Failure modes	16
3.3 Review of existing concepts for brittle material parts	18
3.4 Discussion on concepts of structural integrity assurance	21
3.4.1 Issues of existing concepts	21
3.4.2 Discussions	22
3.5 Proposals of the concepts	28
3.5.1 Existing codes considering the presence of flaws, and flaw detection of In brittle materials	28
3.5.2 Proposals of concepts of assuring structural integrity for brittle material parts	29
4. Concepts of structural integrity assurance for reduced ductility material components, and discussion on systematic concepts	38
4.1 Needs of systematic concepts	38
4.2 Mechanical property of reduced ductility materials	40
4.2.1 Fracture	40
4.2.2 Plastic deformation	46
4.3 Basic philosophy	54
4.4 Proposal of concepts	60
4.4.1 Framework of structural code	60
4.4.2 Engineering steps to be considered	60
4.4.3 Material	61
4.4.4 Design	65
5. Concluding remarks and on future research works	89
Acknowledgements	91
References	92

1. まえがき

近年、発電システムなどのエネルギー供給システムにおいては高効率化、供用期間の長期化などの要求が厳しくなっており、このため、使用条件がますます苛酷になってきている。さらに、地球環境に調和し、安全性確保を適切に図りながら経済性を飛躍的に向上させる新しいシステムが探求されている。例えば、原子力分野では、軽水炉が燃料の高燃焼度化やプラント運転期間の長期化を目指しており、新システムとしては高温ガス炉による水素製造、核融合システムなどの研究開発が進められている。このような要求を満たすシステムを実現するためには、従来の考え方の延長という発想ではいろいろな面で限界に達し、限界を打破する革新的な考え方が求められる。機器の構造健全性確保（あるいは品質確保）のための構造規格についてもしかりである。

従来のほとんどの構造規格[1-1]においては、加工硬化を明瞭に示す高延性材（延性が十分に高い材料）を使用すること、機械的性質が使用中に大きく変わることがないことを前提としていた[1-2]。しかし、使用条件が苛酷になると、高強度を目指したがゆえに延性が低下した構造材料を用いることが必要不可欠になってくる。あるいは、使用している構造材料が、使用中に、運転初期段階に有していた性質とは大きく異なる機械的性質を示すようになることがありうる。実際、中性子照射量が著しく増大して照射損傷量が数 dpa を超えると、使用温度によっては引張破断伸びが著しく低下したり、見かけ上、加工軟化する場合がある[1-3]。また、新システムにおいて、例えば、核融合システムでは、プラズマ計測などのために透過性などに優れた材料を必要とし、従来は強度部材として想定していなかった人工ダイヤモンドやサファイアなど脆性的な非金属を強度部材として使用する計画がある[1-4]。問題をさらに複雑にしていることとして、この非金属を高延性材と接合する場合があります、力学的に影響しあうことになる。さらには、電磁力という、圧力とは力学的特性が異なる荷重が作用する場合には、耐圧機器の構造規格である従来規格を準用することは必ずしも適切ではない。

高延性材を用いた耐圧機器については健全性確保の考え方は百年に渡る経験があり十分に確立している。しかし、脆性材に対しては、高強度が求められる部品としては、黒鉛やファインセラミックスの構造物に対する考え方[1-5]が提案されたに留まっている。高照射の結果、延性が少なからずあるが高延性というには足りない場合については、ほとんど検討されていない。

そこで、著者は、高延性材ほど十分に延性が高くない高強度材、経年変化などにより運転初期段階とは大きく異なる材料特性を示すようになる材料、さらには、非金属など脆性的な材料について、機械的性質や構造挙動などを分析し、圧力以外の荷重へも適用できる構造健全性確保の考え方を提案することを目指している。

このような検討に際して特段の考慮を払うべきこととして、使用条件が苛酷化した場合、あるいは、新システムにおいては、このように機械的性質が著しく異なる材料を一つのシステムの中で使用し、それらがお互いに影響を及ぼしあうことである。

機械的性質が大きく異なれば、あるいは、使用条件が著しく異なれば、想定すべき破損モードが異なるのは当然であるが、材料ごとに構造健全性確保の考え方を考案し、構造規格を作成することが合理的とは思われない。例を挙げれば、許容応力を定めるための因子（例えば、引張強さ）

に設定する設計裕度(安全率。現在は設計係数と称しているが意味合いを明示することを目的に、以前使われた設計裕度を本レポートでは用いる)は材料の特性が異なれば違って当然であるが、その考え方に一貫性がないと、ある材料に対しては過度に安全側になるが、別の材料では安全裕度が適切に確保されているとはいいがたいことになりかねない。構造規格のなかで材料ごとに考え方が大きく異なると、構造規格使用者が混乱する。また、使用が長期化する結果として従来対象としていなかった機械的性質へと変化する場合、往々にして従来規格の「修正」という考え方では対応できないことがある。そうなる、使用期間によって異なる考え方を使い分けなければならない、これも混乱の元となる。特に、欠陥の取り扱い方まで異なると、構造設計にとどまらず材料の受入検査や溶接部の欠陥検査などの考え方も異なってくる。そうなる、品質保証の観点からも適切な対応が必要不可欠となる。

従って、一貫した思想体系のもとに高延性材から脆性材までを取り扱えるように設計手法などを考案していくことが重要といえる。難しいことではあるが。これは、設計、製作、検査という技術的な側面だけでなく、品質保証といったソフト面からも構造健全性(あるいは品質)の確保を考えていく上で極めて重要である。しかしながら、このような観点から構造健全性確保の考え方を検討した例は、著者が調べた範囲においては見出せなかった。

以上のことから、体系的に一貫した思想が可能か、あるべき姿はどのようなものであるかを検討し、この思想の下で高延性材から脆性材まで体系的な構造健全性確保の考え方とは具体的にどうあるべきかについて提案することを目指す。すなわち、高延性材、脆性材、さらにはその中間的な特性を示す材料を用いる場合の構造健全性確保の考え方を検討し、体系化、一貫性という観点からのあるべき姿を提案する。これは、材料によらず統一した考え方を開発しようとするものではない。それは現実的ではないと考える。

構造健全性確保の考え方を構築するためには、まず、当該機器においてどのようなモードの破損が起こりうるか明らかにし、その上で、各々のモードの破損を防止する考え方を検討することが必要である。破損防止の考え方は、想定する破損モードに係る強度や変形などのパラメータ(限界特性、あるいは破損特性)を特定してその破損条件を解明し、どのくらいの裕度をもって破損を防止すればよいかを考察することで構築されよう。

本報は、第一段階として、これまでの構造規格、すなわち、既に公表されている高延性材と脆性材の構造規格を分析してその考え方を明らかにした上で、高中性子照射を受けた材料のようにその中間と考えられるような材料特性を示す場合の構造健全性確保の考え方を考察し、提案する。

具体的には、最初に、既に強度部材として使用されている高延性材や脆性材について、著者らが行った試験結果などをベースにこれまでに公表されている健全性確保の考え方を分析し、想定する破損モードや破損に係る強度、変形等のパラメータは何かを明らかにする。高延性材と脆性材との中間的な場合については、延性が比較的低い高強度材の機器を対象にした規格、例えば、ASME B&PV Code Section VIII, Division 3[1-6]を参考にしつつ、中性子照射により破断伸びが低下した場合など種々の例を分析して機械的性質や想定すべき破損モードなどを考察する。この結果に基づき、破損防止の考え方を体系的に検討する。今後は、これを発展させて、構造健全性確保の考え方として一貫した体系的な思想、さらには、破損防止の考え方を考察する。

なお、本レポートでは、非クリープ温度域を対象にする。

2. 高延性材を用いた機器の規格における健全性確保の考え方の分析

耐圧機器に適用している現行の構造規格は、19 世紀後半から 20 世紀初頭にかけてたびたび起きたボイラなどのバースト事故を防止するために 1910 年代に制定された ASME のボイラ規格を原型として[2-1]、その後の使用経験や新たな知見を反映して合理化や詳細化がなされてきたものである。許容応力の策定にあたって考慮すべき強度因子や設計裕度（あるいは安全率）などは、経験に基づいて決めている。これらの耐圧機器規格では、高延性、高靱性の材料を使用することを前提としている。

一方、脆性的なセラミックスも近年になって強度部材として使用されるようになってきた。高温ガス炉の炉心支持構造物などに黒鉛が使用され、ガスタービンや自動車エンジンなどにファイナセラミックスが使用されつつある。

高延性材から脆性材まで統一的な思想に基づく構造健全性確保の考え方を考察する上で、これら高延性材と脆性的な材料に対する健全性確保の考え方を分析することは出発点として重要である。そこで、本章と次章において、それぞれの材料について、まず、そもそもどのような機械的性質なのかを明らかにする。その上で、そのような機械的性質の場合にはどのような破損を想定すべきかを整理し、その破損防止のための考え方を分析する。さらに、どのくらいの裕度をもって破損を防止しようとしているのか、すなわち、設計裕度（あるいは安全率）の考え方を検討する。

2.1 機械的性質

機械的性質として本レポートでの考察に係る主な性質は、次のようにまとめることができる。

- (1) 延性が高い。別の表現で言えば破壊に至るまでの塑性変形能が大きい。塑性変形は、せん断応力によって転位がすべり面上をすべることによって生ずる。
- (2) 塑性変形が増すに従い、加工硬化する。引張試験のような引張荷重が支配的な負荷条件では、降伏後さらに荷重を増していくと、ある条件の硬化率のところで、塑性不安定化してくびれ（拡散くびれ）が始まる。くびれが起こると、引張荷重が負荷したままでは変形は無制限に急速に進展する。同時に、変形はこのくびれ部に局所化する。ただし、局所化するといっても、まだ比較的広い領域（丸棒の引張試験では、試験片の長さとして、棒直径程度）で変化が拡散して進展することから、拡散くびれと称する。このくびれが生じる結果、これ以上荷重を増やすことができず、荷重を負荷したままにしておくと、さらに、ごく狭い領域にせん断変形帯が生じて変形が集中する局所くびれが生ずる。局所くびれが生ずるとまもなく延性破壊に至る[2-2]。
- (3) このくびれのように塑性変形（塑性流動）が局所化するメカニズムとしては、くびれ（拡散くびれと局所くびれ）、せん断変形帯、塑性不安定化及び分岐（bifurcation）が知られている[2-3]。ただし、塑性不安定化と分岐は、それが即、塑性変形の局所化を意味しているわけではない。塑性不安定化とは、一様な変形が不安定になる点と定義される。拡散くびれの開始点を実験的に同定するのは容易ではないので、概念的には、塑性変形の局所化の開始を

塑性変形の不安定化や分岐点により表している。

塑性不安定化は、上述した定義から、軟化の効果が加工硬化（正式にはひずみ硬化）の効果を上回る時に生ずる。引張試験において引張荷重を受ける丸棒の場合には、軟化は幾何学的な軟化として生じ、断面積の収縮 dA として表わされる。一方、硬化は、 $d\sigma$ として表わされる。両者がバランスする点が塑性不安定化の条件であり、拡散くびれの開始条件となる。それは、次式である。

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \sigma \quad (2.1)$$

一方、引張試験において引張荷重 L を受ける丸棒の場合、次式を満たす荷重点が存在し、これが負荷できる最大荷重となる。

$$dL = d(\sigma A) = \sigma dA + A d\sigma = 0 \quad (2.2)$$

この式は結局、 $d\sigma/d\varepsilon = \sigma$ となる。これは、単軸引張荷重を受ける丸棒では、「塑性不安定化条件」＝「拡散くびれ発生条件」＝「最大荷重点条件」であることを物語っている。

破壊を考えるとときに重要なことは、この最大荷重点を表す応力を極限引張強さ（あるいは単純に引張強さ）と称しているが、この極限引張強さ σ_u は、引張荷重を受ける丸棒の場合について、くびれの開始条件を表し、さらには、これ以上の荷重、従って、公称応力は不可能ということを意味しているだけであり、破壊については、直接は何も物語っていない、ということである。結果論としてその引張荷重を負荷し続けると、すなわち、その公称応力を維持すると延性破壊に至るということである。

- (4) 延性破壊のメカニズムに言及すると、**Fig.2.1** に模式的に示すように、微視的に見た場合に、ボイドの発生、成長、合体を伴う場合とそうでない場合の2つの壊れ方がある。一つは、引張試験の場合で言えば、くびれによって生じた高応力部において塑性変形が加速され、この結果、析出物や介在物などが核となってボイドが生じ、これが成長、合体する。すなわち、析出物や介在物は、母地に比べてもろいなどの理由から、塑性変形が進むと破壊してしまったり母地との間で界面はく離を起こしたりする。その結果、ボイドが生成する。ボイドが合体してき裂を形成するが、このき裂間のリガメント部において応力集中のためにさらに変形が進み、すべり面に沿ってせん断によってすべり分離を引き起こすと考えられている。

もう一つは、不純物を含まない高純度金属に見られるように、完全に塑性変形だけが進行してすべり分離を引き起こす。このように、ボイドが生成される場合には、塑性変形がリガメント部に局在化するため、ボイドの発生、成長、合体が起きやすければ起きやすいほど破断時の巨視的な変形は減少することになる。

なお、ボイドは、母地の塑性変形がある限界値に達したときに生ずるとする説が提案されている。

- (5) 構造規格においてどの程度の加工硬化を前提としているかという点、降伏強さ σ_y と引張強さ（極限引張強さ） σ_u との比（降伏比）でいえば、約 0.9 以下と推測される。この場合、

一様伸びは約5%以上と考えられる[2-4]。なお、1970年代に入って高圧力化が進んだ結果、降伏比がほぼ1.0の高強度鋼も使用されるようになった。米国では、この材料を用いた超高压容器の規格が制定された（ASME B&PV Code Section VIII, Division 3[1-6]）。

- (6) しかし、炭素鋼や低合金鋼といった体心立方格子系などの材料では、低温域では延性が著しく低下し、脆性破壊（そのメカニズムとしては、特に、へき開面で分離するへき開破壊）が生じる場合がある。延性が著しく低下してのへき開破壊は、次のメカニズムで起こると考えられている。すなわち、炭化物や介在物が破壊して微小き裂が発生し、あるいは、延性が低下したといっても塑性変形するので転位の集積などの結果として微小き裂が発生し、応力が低い段階ではこの微小き裂は停留するが、高応力となって変形が進むに従い微小き裂の数を増していき、破壊直前に発生した微小き裂は停留する前に他と連結し、急速に進展する。

なお、延性破壊、脆性破壊は、破壊までに生ずる塑性変形の程度によって分類した用語であり、必ずしも破壊のメカニズムと対応しているわけではない。メカニズムとの対応については、後ほど検討する。

2.2 破損モード

高延性材を用いる場合には塑性変形を許容することは合理的である。それ故、構造健全性の確保、すなわち、適切な裕度をもって安全性などの要求機能を確保するためには、破壊することを防止するだけでなく、破壊には至らないが要求機能を損なうくらいに過度に変形したりすることを防止する必要がある。従って、防止すべき破損のモードとしては、破壊そのもの、塑性変形するがゆえの破損、不安定現象および環境効果による破損に分類して考えることができる。

- (1) 破壊として、延性破壊を想定する必要がある。延性破壊は十分な塑性変形が生じた後に起こることから、一次応力を生じる荷重（あるいは、外力あるいは外力に起因する荷重、**force-induced loadings**）によって引き起こされる。塑性変形は、き裂先端の曲率を大きくして先端での応力集中を低下させて、き裂先端での応力の上昇を抑制する。この他、後述する理由と併せ、塑性変形するゆえに高延性ではき裂が進展するのに大きなエネルギーを必要とする。その結果、不安定化して急速に進展して破壊するき裂のサイズは相対的に大きく、通常は適切な非破壊検査手法（超音波探傷検査や放射線透過検査など）で十分に検出することが可能なサイズである。破壊靱性が十分に高いときには、き裂が進展し板厚を貫通しても不安定破壊に至らず加圧流体の漏えいにとどまる場合がありうる。この場合には、破断前漏えい（あるいは、バースト前漏えい、**LBB**）が成立しうる。
- (2) しかし、低温域などでは、延性が低下し、破壊に至るまでに生じるみかけの塑性変形の量が少ない脆性破壊の可能性を考慮する必要がある。さらに、脆性破壊は、衝撃荷重を受ける場合や、鋭いき裂などで塑性変形が著しく抑制されたりする場合に起こる可能性がある。このほか、焼き戻し脆化などによっても低温側などで脆性破壊が生じる。破壊までの塑性変形量が少ないといっても、き裂先端ではそれなりの塑性変形が生じている。脆性破壊のメカニズムの一つに、へき開破壊がある（へき開は、**劈開**と書き、さきひらくことを言う）。結晶中のへき開面と称する格子面に沿って分離することで生じる。欠陥がないとしてへき開面を全面で一度に引張分離させるのに要する理論的な強度に対し、実際にはその1/20程度でへき開

破壊が生じている。この差は、次のように説明されている[2-5]。まず、せん断応力により転位がすべり、転位の集積による応力集中効果などによってき裂が生じる。そのき裂が、引張応力の作用下で拡大して破壊に至る。あたかも塑性変形を説明するために転位が考え出されたことに似ている。

- (3) 過大な塑性変形は、確保すべき機能の喪失を招く。さらには、いくつかの破損防止規定は、累積ひずみなどを限定して作成されている。どのような荷重が負荷し、それによってどのような応力が発生するかによって構造物に現れる変形現象が異なりうるが、考えられうるプラントでの発生応力の特性は原子炉などの既存プラントの場合と大きくは変わらないと考えられる（例えば、一次応力、二次応力、ピーク応力に分類できること）。従って、塑性変形を許容するが故に防止すべき破損のモードとしては、以下を想定するのが適切であると考えられる。

- 1) 構造物全体に及ぶ（総体的な）過大な塑性変形、あるいは変形が不安定化した結果としての荷重載荷能力の喪失

この過大な変形や載荷能力の喪失は、一次応力を生じる荷重によって起こる。塑性変形が不安定化すると（すなわち、硬化よりも軟化が上回る結果として、荷重を増やさなくても変形が際限なく増大してしまう）荷重載荷能力を喪失してしまう。あるいは、不安定化しないまでも構造物の全面に渡って塑性変形が生じ、過大な変形を生じるとともに、場合によっては、塑性ヒンジの形成などの結果、やはり荷重載荷能力の喪失に至る場合もある。後者は塑性崩壊と称している。塑性不安定や塑性崩壊という破損モードは、1回の負荷でも起こる。

- 2) 板厚全面での漸増変形

構造物全体に及ぶほどではないにしても、ある部位の板厚全面に渡る過大な塑性変形は、二次応力を生じる荷重（例えば、変位に起因する荷重）が繰り返し負荷する場合にラチェット条件を満たすと起こる。

- 3) 構造不連続部などにおける局所的に過大な変形

- (4) 局所的にでも塑性変形する場合には、繰り返し負荷によって疲労き裂が生じうる（なお、「繰り返し」は、日本語としては、「繰り返す」とすべきであろうが、慣習から「繰り返し」とする）。疲労き裂は、多くの場合、自由表面から発生する。疲労き裂はいろいろな原因で発生する。一例として、繰り返し荷重により形成されるすべり帯に突出しや入り込みが生じ、これがき裂となる。そうすると、すべり帯の形成に伴って生じるすべり面に沿ってき裂は進展する。その後、主応力に直角な面の方向に向きを変える。そして、応力サイクルごとに少しずつ進展する。引張応力が負荷し始めたときにはき裂先端は鋭い。応力が増しき裂先端の塑性域が拡大すると新しい破面が形成される。このとき、き裂先端は鈍化する。除荷が始まるときき裂先端が閉じ始める。そして、き裂先端の鋭さが回復する[2-6]。

- (5) 不安定現象としては、弾性座屈、塑性座屈がある。

- (6) 環境効果による破損としては、応力腐食割れ、環境疲労などがある。

2.3 破損防止の基本的な考え方

現行の構造規格[1-1,2-7]を解説書[2-1, 2-8]などと併せて分析した結果、上述した機械的性質ゆえに、想定される破損モードに対して下記のようにして破損防止を図ることで、構造健全性を確保していると考えられる。

- (1) 基本的な考え方として、破壊を引き起こすような有害な欠陥が使用前の段階で存在しないこと、並びに、使用中に発生しないこととし、さらに、機能喪失に至るような有害な変形が生じないこととしている。どの程度を有害と言うかは、機器の重要性、負荷荷重の重大性（発生頻度や、その荷重に対して許容される損傷の程度など）などによって異なることとするのが合理的であろう。
- (2) 使用前の段階で有害な欠陥が材料中に存在しないために、材料加工や溶接などにおける品質管理、実証された溶接・ロウ付け施工技術や非破壊検査技術の適用、高延性・高靱性などを要求する。特に、製作段階で新たに材料を溶かした溶接部あるいはロウ付け部については、適切に非破壊検査を実施し、検出する欠陥がないことを確認する。
- (3) 使用中に有害な欠陥や変形の発生がないように、設計段階で想定する荷重（あるいは応力）や荷重により生ずる変形、ひずみを適切に制限する。
- (4) 使用中に万が一何らかの理由により有害な欠陥が発生し、進展したとしても、不安定破壊に至らないように、上記（3）の制限に加え、十分な靱性を有していることを確認する。
- (5) 脆性破壊が生じないように、十分な延性・靱性が確保される温度で使用することを求める。
- (6) 公衆、従事者の安全確保上特段の配慮が必要な原子炉施設のなかで特に重要な機器については、上記（2）、（3）、（4）、（5）に関して厳しい制限を課すだけでなく、使用中に欠陥が発見された場合には欠陥の安定性を評価し、補修などの適切な対応を求める。
- (7) 有害な変形を防止する上で、許容される変形量はプラントによって異なるので、使用者が仕様書などで定める。ラチェット現象による進行性変形（あるいは漸増変形）に対しては、その有害さから、ラチェットの発生を防止することを基本とする。なお、現行の構造規格においては、いくつかの規定が累積ひずみなどに関してある前提の下で作成されている。その前提を満足することを求める。一例として、疲労き裂の発生を防止するための規定（疲労損傷制限）においては、ラチェットひずみが疲労損傷の許容範囲に影響を及ぼすことからラチェットひずみの累積がないことを前提としている。このため、シェイクダウンすることを求める（例えば、 $2S_y$ あるいは $3S_m$ 制限）。
- (8) 各モードの破損をどのような荷重が引き起こすかはモードによって異なる。さらに、延性破壊、塑性崩壊、脆性破壊や座屈はその破損の特性、引き起こす荷重の特性から 1 回の荷重負荷（single load application）でも生じうる。それに対して、進行性変形や疲労き裂の発生は、荷重が繰返し負荷すること(cyclic load application)によって生ずる。このようにモードによって破損の重大性が異なることから、破損モードに対応させた荷重分類、あるいは応力分類をすることが望ましい。さらに、同じ荷重でも、平滑的な一般部に負荷する場合か、構造不連続部に負荷するかによって発生する応力の性質が異なったりする。そこで、(特に、複数の荷重が負荷する場合も考えて、) どのような破損を引き起こす荷重によって生じているのか、そもそもどの部位に生じているものであるかに着目して応力を分解し、それぞれ、一

3. 脆性材を用いた部品の考え方について分析と提案

近年、エネルギープラントに要求される運転条件は高温、高圧化し、ますます苛酷になってきている。苛酷となってきた結果、ニッケル合金やコバルト合金のような耐熱合金でも限界を実感せざるを得なくなっている。一方、高強度のセラミックスは、高温強度のみならず耐熱性、耐食性などの観点からこれらの金属合金に代替することが期待されており、一部ではガスタービン翼などとして実用化されつつある。しかしながら、延性や靱性が金属に比べて著しく低い。この結果、高延性材と異なり、通常運転の範囲においてさえ脆性破壊の可能性がある。さらに、セラミックス中に存在する微視的な欠陥でさえ応力集中によりき裂として発生し、進展するのに十分な大きさという場合が往々にしてある。このため、欠陥のない理想的な破壊強度よりもはるかに低い応力で破壊することになる。使用開始時にすでに存在する微視的な欠陥が最終的な破壊の起点となることが、破壊強度データが大きくばらつくことの原因となっている。

従って、セラミックスを構造部材として使用するためには、その健全性あるいは品質を、高い信頼性をもって保証できるようにすることが必要不可欠である。保証のためには、初期欠陥の制御が極めて重要である。そもそも、これまで何故に高延性が求められてきたかといえ、下記のことからその理由として挙げられている[3-1]。

- (a) 構造不連続を避けることができないという認識から、そこで発生する高応力集中でも健全性を確保できるように。
- (b) 衝撃荷重に対して安全に、健全性を確保できるように。
- (c) 応力の突然の、急激な変化に対しても健全性を確保できるように。

従って、構造設計としても、高延性材に比べてこれらの観点から細心の注意が必要であり、具体的には、下記の点などについて特段に留意すべきである[3-2]。

- (1) なるべく圧縮応力が生ずるような荷重負荷を考慮する。
- (2) 構造不連続な形状を避け、応力集中やひずみ集中を防ぐ。
- (3) 機械的な衝撃荷重が加わらないようにする。
- (4) 接合部の構造は、ひずみ集中を招くような形状や異材の組合せを避ける、など。

この他、脆性材の破壊は表面き裂から始まる場合が多いので、表面管理も大切である。

本節では、セラミックスのような脆性材料の健全性を保証するためにはどのようにすべきかを、前節で述べた高延性材に対する検討に対比させながら考察する。まず、その固有な機械的性質を明らかにする。そして、どのようなモードの破損が想定されるのか、過去の検討例[3-3, 3-4]や教科書[3-5]を分析する。その上で、破損防止の考え方及びこれに基づく健全性確保のための具体的な考え方について提案する。

なお、脆性材と言っても、破壊まで全く塑性変形を伴わず、いわゆる弾性状態にある完全脆性から、破壊するまでに少しは塑性変形を伴う場合までである。本節では、典型的な脆性材として、CVD ダイアモンドなどのような完全脆性材を想定しながら検討する。この CVD ダイアモンドは、核融合システムのなかで超高真空を作り出す真空容器の一部として用いられることが計画されており、強度部材となる。

面側から降伏していき、最終的に塑性ヒンジが形成され、全断面に渡って降伏する。このときでも塑性不安定にはならない（弾完全塑性体の場合は特別であり、加工硬化が期待できないため、不安定化する）。

2.4 設計裕度の考え方

設計裕度（あるいは設計係数。昔の言い方では安全率や安全裕度）とは、ある破損モードにおいてこれを超えたら破損するという限界強度（あるいは、破損強度とも称する）に対して適切な裕度をもって許容応力を策定するための定数である。20 世紀初頭に耐圧容器に対する構造規格が策定されて以来、設計裕度は品質向上に直結する技術進展などを考慮して合理化されてきた。従来は、安全率などと称されていたが、この用語では安全が切り下げられるとの誤解が生じることを懸念し、最近、設計裕度あるいは別の言葉に修正することが提案されている。ここでは、この提案に同意し、設計裕度という。

設計裕度は、これまで経験から定められてきた。そもそも最初の耐圧容器規格においては、バースト事故を防止するため、最高許容運転圧力 P は下式とすることが規定されていた[2-10]。

$$P = \frac{TS \times t \times E}{R \times FS} \quad (2.3)$$

ここで、 TS は極限引張強さ、 t は胴板の最小板厚、 E は長手方向継手効率またはリガメント効率（ただし、当時はリベット接合）、 R は内径、 FS は当時の言い方では安全率（factor of safety）。 FS は 5 であった。

バースト事故が生ずる可能性が大きいのは、まず耐圧試験時である。重大な設計ミスや製造ミス、検査ミスなど建設段階でのミスがあり、耐圧試験時までに気がつかないと、耐圧試験時にバーストする可能性がある。使用開始後何年かして生ずる場合には、運転方法に問題があった場合が多い。いずれにしても、耐圧試験時も含めてバーストは設計解析では評価していない要因、例えば、想定していなかった何らかの原因による疲労き裂の発生、環境効果、材料特性の劣化、などによって起きる。最高許容運転圧力でバーストしないように設計するだけでなく、このような要因にも配慮してバースト事故の防止を図るのであれば、すなわち、そのための設計裕度（安全率）であるとする、設計裕度は経験に基づいて定めざるを得ないということになる[2-11]。

バースト防止のための限界特性としては極限引張強さを用いているので、バースト事故を合理的に防止するためには、極限引張強さに乗ずる設計裕度を合理的に設定することになる。しかし、このような理由から、この設計裕度を設計解析のなかで設定することができず（強度データのばらつきなどであれば、統計解析などにより設計解析の一環として設定できるが）、経験的に決めることになる。とは言っても、5 のままでこまねいていたわけではなく、製造技術などが成熟して信頼性が向上したり、検査技術などがより高精度に革新されたりなどの技術進展があり、また、合理化要請などもあり、これらを評価して数十年間隔で設計裕度が合理化されてきている。

Table 2.1 Concepts of design criteria for preventing failures in ductile materials

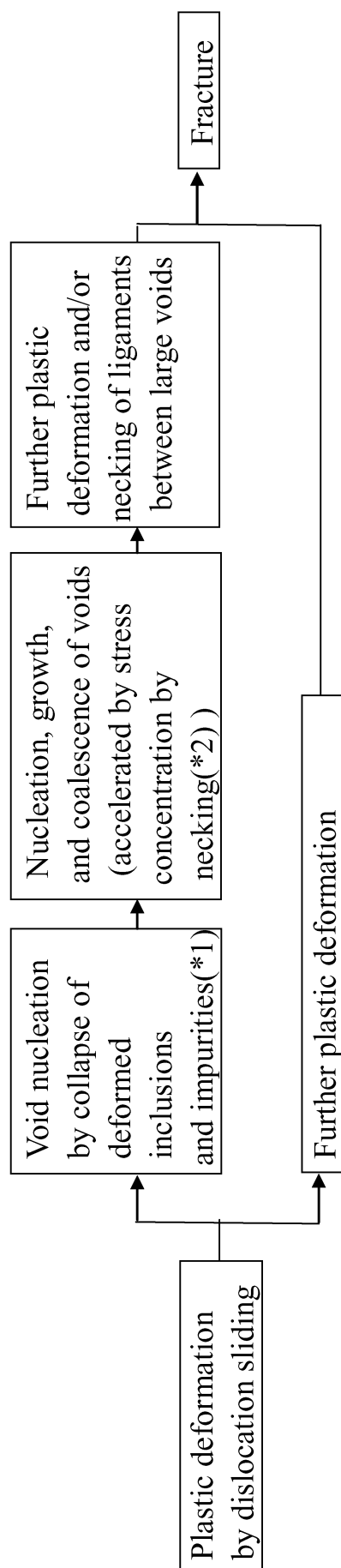
Failure mode		Loading/stress to cause failure		Failure is caused by single or cyclic load application	Limiting strength or ductility (resistance)	Concept of preventing failure (in USA and Japan)
		Loading	Stress			
Fracture (instantaneous upon load application)	Ductile fracture	Force-induced loading	Primary stress P	Even by single application	Fracture strength σ_f or fracture ductility	$P \leq \frac{\sigma_f}{DF}$
	Brittle fracture	Force- and displacement-induced loading	Total stress T	Even by single application	Fracture toughness	Limit on low temperature operation
Loss of functions by plasticity-induced distortion	Plastic instability or plastic collapse	Force-induced loading	Primary stress P	Even by single application	Ultimate strength σ_u tensile	$P \leq \frac{\sigma_u}{DF}$
	Local excessive deformation	Force-induced loading	Local primary stress P	Even by single application	Yield strength σ_y	$P \leq \frac{\sigma_y}{DF}$
	Ratcheting	Force- and displacement-induced loading	Primary + secondary stress P+S	By cyclic application	Deformation requirement or σ_y	Shakedown
	Fatigue cracking	Force- and displacement-induced loading	Total stress amplitude T	By cyclic application	Fatigue strength σ_a or fatigue life N_f	$T \leq \sigma_a$ or $N \leq N_f$
Instability	Buckling	Force- and displacement-induced loading	Primary + secondary stress P+S	Even by single application	Critical stress σ_c or rigidity	$P + S \leq \frac{\sigma_c}{DF}$

Table 2.1 Concepts of design criteria for preventing failures in ductile materials (cont'd)

Failure mode	Loading/stress to cause failure		Failure is caused by single or cyclic load application	Limiting strength or ductility (resistance)	Concept of preventing failure (in USA and Japan)
	Loading	Stress			
Environmental effect	Force- and displacement-induced loading	Total stress amplitude T	By cyclic application	Fatigue strength σ_a or fatigue life N_f	Directly limit on cumulative fatigue usage factor U Basic concept is as follows : $N_{FW}=N_{fA}/F_{en}$, N_{FW} ; fatigue life in cooling water, N_{fA} ; fatigue life in air, F_{en} ; environmental fatigue life correction factor

Remarks:

- (1) DF: Design margin(or design factor)
- (2) Stress should be stress intensity.
- (3) Concept of preventing failure : The strength should be the design minimum value.
- (4) Other environmental effects than environmental fatigue cracking are not given in the present table, but should be evaluated.,



(*1) Large plastic deformation enough to cause their collapse by stress concentration by necking

(*2) Necking : localized necking as well as diffusion necking

Fig. 2.1 Illustrative concept of process to ductile fracture (shear-type fracture) under tensile loading

3. 脆性材を用いた部品の考え方について分析と提案

近年、エネルギープラントに要求される運転条件は高温、高圧化し、ますます苛酷になってきている。苛酷となってきた結果、ニッケル合金やコバルト合金のような耐熱合金でも限界を実感せざるを得なくなっている。一方、高強度のセラミックスは、高温強度のみならず耐熱性、耐食性などの観点からこれらの金属合金に代替することが期待されており、一部ではガスタービン翼などとして実用化されつつある。しかしながら、延性や靱性が金属に比べて著しく低い。この結果、高延性材と異なり、通常運転の範囲においてさえ脆性破壊の可能性がある。さらに、セラミックス中に存在する微視的な欠陥でさえ応力集中によりき裂として発生し、進展するのに十分な大きさという場合が往々にしてある。このため、欠陥のない理想的な破壊強度よりもはるかに低い応力で破壊することになる。使用開始時にすでに存在する微視的な欠陥が最終的な破壊の起点となることが、破壊強度データが大きくばらつくことの原因となっている。

従って、セラミックスを構造部材として使用するためには、その健全性あるいは品質を、高い信頼性をもって保証できるようにすることが必要不可欠である。保証のためには、初期欠陥の制御が極めて重要である。そもそも、これまで何故に高延性が求められてきたかといえ、下記のことからその理由として挙げられている[3-1]。

- (a) 構造不連続を避けることができないという認識から、そこで発生する高応力集中でも健全性を確保できるように。
- (b) 衝撃荷重に対して安全に、健全性を確保できるように。
- (c) 応力の突然の、急激な変化に対しても健全性を確保できるように。

従って、構造設計としても、高延性材に比べてこれらの観点から細心の注意が必要であり、具体的には、下記の点などについて特段に留意すべきである[3-2]。

- (1) なるべく圧縮応力が生ずるような荷重負荷を考慮する。
- (2) 構造不連続な形状を避け、応力集中やひずみ集中を防ぐ。
- (3) 機械的な衝撃荷重が加わらないようにする。
- (4) 接合部の構造は、ひずみ集中を招くような形状や異材の組合せを避ける、など。

この他、脆性材の破壊は表面き裂から始まる場合が多いので、表面管理も大切である。

本節では、セラミックスのような脆性材料の健全性を保証するためにはどのようにすべきかを、前節で述べた高延性材に対する検討に対比させながら考察する。まず、その固有な機械的性質を明らかにする。そして、どのようなモードの破損が想定されるのか、過去の検討例[3-3, 3-4]や教科書[3-5]を分析する。その上で、破損防止の考え方及びこれに基づく健全性確保のための具体的な考え方について提案する。

なお、脆性材と言っても、破壊まで全く塑性変形を伴わず、いわゆる弾性状態にある完全脆性から、破壊するまでに少しは塑性変形を伴う場合までである。本節では、典型的な脆性材として、CVD ダイアモンドなどのような完全脆性材を想定しながら検討する。この CVD ダイアモンドは、核融合システムのなかで超高真空を作り出す真空容器の一部として用いられることが計画されており、強度部材となる。

3.1 機械的性質

塑性変形がないということで、破壊の特徴について分析する。

- (1) 完全脆性ゆえに、破壊は脆性破壊である。すなわち、塑性変形を伴わずに破壊に至る。あるいは、塑性変形が生ずる応力よりも低い応力で破壊してしまう。すなわち、降伏強さは破壊に必要な応力（破壊応力）よりも大きい。

ただし、破壊の引き金となるき裂についてみると、その先端が全く弾性域にあるかというとは必ずしもそうとは限らない。一般的には、き裂先端の塑性領域の長さ R は下式より概算することができる[3・6]。

$$R = \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_y} \right)^2 = \frac{\pi}{8} \left(\frac{\sigma_f}{\sigma_y} \right)^2 Yc \quad (3.1)$$

ここで、 $K_{Ic} = \sigma_f(Ya)^{1/2}$: 応力拡大係数、 a はき裂長さの半分（すなわち、き裂長さは $2a$ ）、

σ_f は不安定破壊するときの公称応力（正しくは、臨界応力）、 Y はき裂形状や荷重条件などによって決まる定数（もっとも単純な場合には $Y = \pi$ ）、 σ_y は降伏強さ、 c は不安定破壊を開始する a の値を表す。高強度のセラミックスを想定して仮想的に、 $c=0.5$ 、 $\sigma_f/\sigma_y=1/3$ とすると、 $R=0.07\text{mm}$ と非常に短い。

- (2) 脆性破壊のメカニズムは、高温以外では、ほとんど、へき開破壊である。高延性材の場合と異なり、材料中の初期欠陥における応力集中が起点となってへき開面の分離が始まり、順次、全断面に広がっていく場合が多い。この結果、脆性材の破壊応力は、初期欠陥の分布などに依存することになり、確率的なものになってしまう。これが、脆性材の破壊応力データが大きくばらつく原因となる。このことは何を物語っているかということ、ある材料を使って構築したデータベースから許容応力を定めたとしても製造方法が異なるなどで初期欠陥分布が全く異なるような別の材料に対しては、その許容応力は無意味になってしまう可能性がある、ということである。
- (3) そもそもどのくらいのき裂サイズで不安定破壊が起きてしまうか明らかにしておくことは、破損防止を考える上で非常に重要である。高強度セラミックスの場合、不安定破壊を引き起こすき裂サイズは非常に小さい。セラミックスのなかで構造材として使われているアルミナや窒化珪素などのファインセラミックスは、高強度をその特徴の一つとしている。しかしながら、セラミックスは破壊靱性が極端に低いため、わずかな欠陥であっても、高応力下では不安定破壊を引き起こす長さを超えている、すなわち、限界長さを超えていることが多い。著者のグループがアルミナ、CVD ダイヤモンド、サファイア、石英で行った強度試験からこの限界長さ（半長） a を求めてみると、Table 3.1 のようになり、概ね 1mm 以下である。この欠陥長さは、現在、金属に対して実用化されている欠陥検出技術、特に、内部欠陥の検出が可能な超音波探傷（UT）などの体積的な非破壊検査技術では、実用化されている測定方法の場合には（例えば、超音波探傷でいえば、周波数が 2 MHz など）検出下限を下回っており、検出が容易でないレベルにある。たとえ、セラミックス用に最適化したとしても検出性

には依然として難がある。さらに、CVD ダイヤモンドなどごく少数の材料を除き、多くの材料は、き裂先端での環境効果などから時間とともに、あるいは、荷重繰り返し負荷により、使用中にき裂が進展する可能性がある。この進展も考慮して使用中に限界長さにいたらないように初期長さを制限しようとして使用前の段階で潜在する欠陥そのものを検出しようすると、現状技術では不可能であり、マイクロ UT などかなり斬新な検出技術を必要とすることになる。

- (4) 上述したように、脆性材ゆえの特質から破壊強度データは著しくばらつく。セラミックスの脆性破壊に関してその破壊強さを統計解析する場合、ワイブル分布を仮定するのが一般的である。とりわけ、破壊原因を単一として最弱リンク説から導かれる単一モード2母数統計解析手法がよく用いられる[3-7]。

累積破壊確率 F は強さ（ここでは破壊強さ） σ の関数として、次式で表されるところである。

$$F(\sigma) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (3.2)$$

m : 形状母数（あるいは、ワイブル係数）

σ_0 : 尺度母数（累積破壊確率が 63.2% となる強さの値）

従って、累積破壊確率を α とすると、そのときの破壊強度値は次のように表すことができる。

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \left[\ln \frac{1}{(1-\alpha)} \right]^{1/m} \quad (3.3)$$

また、破壊確率 50% での強度値を $\bar{\sigma}$ とすると、

$$\frac{\sigma}{\bar{\sigma}} = \left[\ln 2 \cdot \ln \frac{1}{(1-\alpha)} \right]^{1/m} \quad (3.4)$$

高延性材ではワイブル係数 m は、通常 30 以上になる。それに対し、脆性材について著者のグループが素材製造メーカーに委託して曲げ強度試験を実施した結果では、アルミナが $m=20$ 、合成石英ガラスが $m=3.3$ 、人工単結晶サファイアが $m=2.8$ であった。いずれも市販品を用いた。石英ガラスとサファイアでは研磨はおこなったが表面の影響をまだ排除できなかった可能性があり、また、試験片の内部欠陥のばらつきが大きかったことから、これらが強度データが大きくばらつく原因となったと推測される。このように脆性材では内部欠陥のばらつきが強度データのばらつきに直結するため、 $m=3$ は極端にしても $m=30$ を大きく下回る。

ワイブル係数の違いによって、ある累積破壊確率 α の値となる強度値がどのように変わるかを [Table 3.2](#) に示す。同表では、 $\alpha=0.1\%$ 、すなわち、99.9% 下限値としている。

$m=10$ では 99.9% 下限値は平均強度の約 1/2、 $m=3$ では 1/10 を下回っている。許容応力に用いる限界特性は、平均値（平均強度）ではなく、99.9% 下限値のような設計上の約束事として定義する「最小」強度である。これに設計裕度を乗じて許容応力を定める。このこと

を考えると、最小強度が平均強度の半分以下というのでは現実的な構造設計は難しい。もしこのような状況が予想されるのであれば、強度データのばらつきが $m=20$ 程度に収まるように、ばらつきの原因となる内部欠陥や表面状態を積極的に制御、管理することが重要である。

上記（３）、（４）の検討から、合理的に破損防止を図るためには材料の品質管理、あるいはもっと積極的に品質制御が極めて重要であることがわかる。しかしながら、欠陥を直接的に検出することは現実的には容易でない。どのような品質制御を行うのが適切か、そして、その品質制御を行うことを、破損防止策にどのように合理的に組み込むか、そして構造健全性の確保にどのように展開するかを検討することが必要である。このことは、3.4 節で提案する。

3.2 破損モード

文献を分析すると、特に高強度セラミックスはほとんど、あるいは全く塑性変形しないため、高延性材の機器に想定した、塑性変形するが故の破損は、脆性材の機器に対して想定する必要はない。従って、上述の検討や著者の経験から、下記の破損モードを少なくとも想定する必要があると考える。機器ごとにどのような破損モードを想定しているか、という実際については、3.4 節に述べる。

- （１） 破壊として、まず、潜在するき裂が、１回の負荷で即時に不安定化して急速に進展し、かつ、塑性変形をほとんど伴わない脆性破壊を想定する必要がある。高温でなければ、そのメカニズムは少なくとも引張応力に対してはへき開破壊といえよう。高延性材においては塑性変形が応力抑制効果をもち、この塑性変形がき裂進展における大きなエネルギー吸収過程と考えられるが、脆性材ではこれがないため、応力を抑制する機構が存在しない。従って、き裂が発生すると、その応力条件ではき裂が進展し、破壊に至る可能性が高くなる。すなわち、高延性材ではき裂進展が破壊に至るプロセスにおいて最も重要であったが、脆性材ではき裂発生が最も重要となる。

塑性変形がエネルギー吸収過程と考えるわけ：

き裂が進展すると、その部分の原子面が切れて空洞になる。応力が解放されてしまうため、全体のひずみエネルギーも増加した空洞分だけ減少する。（余談であるが、地震は、この放出エネルギーによって引き起こされる。）一方、空洞が増えてき裂面が増加すると、表面エネルギーが増加すると考えられる。以上から、き裂進展に伴い解放されると考えられる歪エネルギーが、増えると考えられる表面エネルギーよりも多ければ、き裂は進展する。しかしながら、塑性変形がき裂先端で生じる場合、き裂が進展するとそのき裂先端近傍に塑性変形を生じさせるためには相当の塑性仕事を必要とする。従って、解放されるエネルギーの大部分がこの塑性仕事に費やされてしまう。解放エネルギーの吸収過程として作用する、あるいは、き裂進展の抵抗となる。

脆性破壊は、熱応力などの二次応力や局所的な応力によっても起こる可能性がある。すなわち、最大応力が、破壊応力 σ_f に達してき裂を不安定に進展させるのに十分な領域に渡って生じていると、これらの応力によっても脆性破壊が起こりうる[3-8]。

圧縮荷重に対してはせん断応力により破壊する。

- (2) 負荷時に即座に破壊せずに、負荷してある時間が経過した後に突然破壊することがある。これを遅れ破壊という。あるいは、静的疲労とも言う。ある環境条件では、き裂の発生と進展が促進されることがあり、このような場合に、遅れ破壊を引き起こす。金属で起こる応力腐食割れも同様な現象である。ただし、遅れ破壊が起こるか起きないかは材料によるし、環境条件にも依存する。化学気相合成法 (chemical vapor deposited, CVD) によって合成される人工ダイヤモンドの場合は、著者らのグループによる試験では、通常の空气中程度では環境影響を受けず、従って、遅れ破壊が起きることはなかった[1-4]。

なお、遅れ破壊を引き起こす応力には下限が存在する場合があることがいくつかの材料について報告されている。すなわち、それ以下の応力ではいかに長時間負荷しようとも破壊には至らない。これを静的疲労限と称する。これは、静的疲労限以下の応力では、き裂先端に何ら構造的変化が起こらないからと考えられている。その変化の原因として塑性変形の存在が考えられている。このことは、ふつうの脆性材料では、材料中に限定された塑性変形が生じうることを示唆していると考えられている。ただし、疲労限のメカニズムは必ずしも明確ではなく、これが現れない材料もある。

- (3) いくつかの材料では疲れ破壊を想定しておく必要がある。高延性材の場合に LBB として期待されるような、貫通しても漏えいに留まる、といったことは期待できない。従って、破損ではなく、破壊となる。ガラス繊維強化熱硬化性樹脂 (glass-fiber reinforced thermosetting resin, GFRP 又は FRP と略称する) では、繰返し負荷を受けるとクラックや白化が進行し、剛性が徐々に低下して疲れ破壊に至るとしている[3-9]。

疲れ強さは、上述した静的な破壊強さよりもはるかに低くなる場合があり、FRP では高サイクル側で静的破壊強さの約 0.3 倍まで低下することが報告されている[3-10]。

- (4) 不安定現象として、弾性座屈がある。

3.3 既存の脆性材部品に対する規格の分析

健全性確保の方策を記した構造規格については、著者の知る限り、黒鉛、ファインセラミックス及び FRP を用いた部品や構造物の場合について、既に公表されている。これらの詳細を分析すると、破損防止の考え方はだいたい共通しているが、この破損防止の考え方に基づき健全性をどのように確保するかという考え方になるとそれぞれの材料の特有さもあり異なっている。そこで、これらの考え方を分析する。その上で、脆性材の場合について破損防止をどのように図ればよいか、そして、合理的に適切な裕度をもって健全性を確保するためにはどうすればよいか、一貫的に考えるとするとどう考えればよいかを提案する。

分析に当たっては、前節までの考察から、下記の視点が重要と考える。

(a) 想定している破損モード

共通するモードについては前節で検討したが、他の材料と異なる場合があるか否か、あるとすれば、その原因は何かを明らかにする必要がある。

(b) 各モードの破損防止策

これは、一言で言えば、共通するモードについては、潜在する欠陥が限界き裂長さに達して不安定化し急速破壊すること（不安定破壊）と座屈を防止することである。脆性材の不安定破壊を防止する概念は、微視的な立場、すなわち、欠陥レベルでの観点からは Fig.3.1 のように考えることができる。不安定破壊する限界サイズを a_f として、遅れ破壊が想定される場合には環境効果による応力下でのき裂の進展 Δa 、また、疲労破壊する場合にはその分のき裂進展を初期欠陥（き裂） a_0 に加えても、適切な裕度をもって限界サイズに達しないようにそれぞれを限定することである。しかしながら、管理すべき欠陥サイズが現状技術の検出下限を下回っているため、代替としてどう対処するかが重要な視点となる。そのような代替の一つとして、欠陥のばらつきが破壊強度のばらつきを引き起こすとの考えから、潜在欠陥の「最大値」を限界特性の「最小」強度として把握する方法がある。この場合には、何をもって「最小」を定義するかが着目すべき視点となる。

(c) 設計裕度

高延性な金属の設計裕度は経験から定めているが、脆性材ではこのような経験が乏しい。限界特性に対してどのくらいの裕度をもって使用限界とするか、特に、設計裕度をどのように設定するかが重要な視点となる。

以上の視点から、既に公開されている黒鉛、ファインセラミックスあるいは FRP を用いた機器の構造規格について分析した結果を Table 3.3 にまとめて示す。

基本的には、破損モードとしては、瞬時破壊（あるいは即時破壊、*instantaneous fracture*）、遅れ破壊（*delayed fracture*、あるいは静的疲労破壊とも言う）、繰り返し疲労破壊（動的疲労破壊）及び座屈を想定している。破損防止の考え方は下式でまとめることができるが、限界強さ R に対して設計裕度 DF で狭めた範囲内に発生応力 σ を制限するという考え方である。

$$\sigma \leq \frac{R}{DF} \quad (3.5)$$

限界強さは、そのデータのばらつきが大きいことを考慮し、破壊確率を明示して（例えば、破壊確率 1 %）そのときの強度値（これを設計最小値、あるいは基準強さと称する）としている。

さらに、ばらつきを限定するために、実機で使用する材料の仕様、条件に限定して試験片を作製し強度試験を行おうとしている。ただし、細かいところで少しずつ考え方が異なっていることがわかる。それぞれに特徴的な考え方について、その背景などを分析してみる。

(1) 黒鉛を用いた高温ガス炉の炉心支持構造物及び炉心構造物の規格[3-11]

破損モードとしては、瞬時破壊、遅れ破壊（静的疲労破壊）、繰り返し疲労破壊（動的疲労破壊）及び座屈を想定している。評価すべき応力の種類が破損モードごとに異なっている。また、許容応力の定め方、その基となる限界特性の設計最小値の定め方もモードによって異なっている。

破損モードと応力との関係では、瞬時破壊を引き起こすのは全応力ではなく一次応力と二次応力であるとしている。これについて明快な説明は見当たらなかったが、以下と考えられる。破壊靱性は他の脆性材とあまり変わらないが、引張破壊強さはかなり低く、高くても 30MPa 程度であるため、不安定破壊を引き起こす限界き裂長さが数 mm を超えるからではないかと考えられる（報告[3-12]によると、有害な欠陥のサイズは 5mm より大きいとしている）。

一方、遅れ破壊については、き裂先端での腐食効果であるため、ピーク応力も含めた全応力で評価している。ただし、時間の関数として強度低下を評価することはせず、単純に、低下した結果として破壊強さの 0.9 倍としている。

設計最小値の定め方であるが、黒鉛の強度データは、原料の種類や製造工程に起因するばらつきが固有なものとしてあり、それは、金属よりも大きい。それゆえに、実機に用いる黒鉛は、設計強度を策定するのに用いた材料と、原料や製造工程などが違わないように制限している。実際には、原料の製造場所や製造工場も指定したと聞く。その上でさらに、重要な限界特性である破壊強さの設計最小値（基準強さと称している）の策定方法は Table 3.2 に記したように確率論に拠っている。黒鉛の場合に極めて特有なことは、受入れ検査として機械的強度検査と称する試験を複数実施し、その材料の強度特性は基準強さを策定するに用いた材料の特性と違わないことを確認することである。すなわち、基準強さを保証するために実施する。

(2) セラミックスガスタービンの規格[3-13]

破損モードとしては、即時破壊を対象とするが、時間依存破壊（時間依存の遅れ破壊とサイクル依存の動的疲労破壊）についても考え方を示している。

即時破壊については、即時破壊強さ σ_u の設計最小値 S_u に対して最大相当応力 $\sigma_{\max}$ を次のように制限する。

$$\sigma_{\max} \leq \frac{S_u}{DF} \quad (3.6)$$

設計最小値は、それ以下の応力で破壊しない確率が 99%以上の応力、すなわち、破壊確率が 1%以下の応力として定義しており、平均強さをある係数 α で除して求める。 α はワイブル係数の関数として図で与えられている。強度を確率変数として取り扱うという考えに立脚しているので、DF は本来であれば機器の許容破壊確率を設定して定めるべきであるが、金属の設計裕度を参考にして定めている。

時間依存破壊については、そのメカニズムは *slow-crack-growth* であると考えられる。欠陥の検出性から、直接に欠陥について議論するのではなく、応力レベルで議論し、最大相当応力を次

のように制限する。

$$\sigma_{\max} \leq \frac{S_t}{DF} \quad (3.7)$$

ここで S_t は設計最小時間強度を表し、強度を時間の関数として表す（静的）設計疲労曲線と設計耐用期間から定める。さらに、繰返しによる加速効果を考慮し、動的疲労試験の結果を繰返し効果として反映する。

なお、ファインセラミックスの設計規格は JIS 化が計画されていた。しかしながら、セラミックスガスタービンや自動車エンジン開発が下火となってしまったので、現在のところ、JIS 化は頓挫している。

(3) ガラス繊維強化プラスチック製耐食貯槽の規格 (Glass-fiber reinforced thermosetting resin chemical-resistant tanks) [3-14, 3-15]

基本的な思想は、下式で表されるように発生応力 σ が許容応力 f 以下となるように材料設計と構造設計を行い、材料選定、構造寸法と形状などを決める。

$$\sigma \leq f = \frac{F_L}{F} \quad (3.8)$$

ここで、許容応力は、限界強度 F_L を設計裕度（安全率） F で除した値である。限界強度には 2 種類あり、材料の破損強度（特に、破壊強さ）の場合と、構造としての剛性、座屈限度の場合がある。静的な材料試験によって限界強度を定める場合には、静的な試験から求まる破壊強さや弾性率の種類（引張強さや引張弾性率など） F_i に、使用条件などを考慮したときの強度低下の割合を表す係数 k_i を乗じて求める。

FRP 構造が使用される環境で強度低下が予想される場合には、限界強度としてはそれらの環境下での値を用いる。また、繰返し負荷による強度低下が予想される場合には、疲れ強さは静的破壊強さに比べてはるかに低いので、設計での限界強度としては実際の使用環境での疲れ強さをとる。

設計裕度は、外力条件、成形条件、設計条件や材料のばらつき具合を考慮して定めるとして、それぞれの不確かさ係数などを規定している。具体的には、材料特性値の信頼度係数、用途・重要度係数、外力荷重の推定の不確かさ係数、構造計算での精度係数、材料特性のばらつき係数、及び、衝撃的負荷を受ける場合の係数など。材料特性のばらつき係数について言及すると、FRP 材料は同一材料と組成でも成形方法・作業員の経験年数・成形環境によって強度値が異なる。材料固有のばらつきも金属に比べて大きい。材料試験を行う場合には、不良率を 0.1%、すなわち、信頼度 99.9% としてばらつき係数を求める。設計裕度は、上記の不確かさなどを考慮して 3 を下回らないことと規定している。

3.4 構造健全性確保の考え方についての考察

3.4.1 現行規格の課題

脆性材を使用した機器の健全性確保の考え方としてあるべき姿を考えると、前節での分析から、現行規格の課題として下記のことが浮かび上がってくる。

- (1) 材料の受入検査として、強度を判定項目にするのが適切か、並びに、その合否基準の考え方

分析した3つの規格は、黒鉛の場合を除いて、材料の受入検査については何も言及しておらず、許容応力としての設計最小強度の定め方を示しているだけである。この設計最小強度をもって材料の受入れ検査の合否基準とすることはできない。限界強度 (limiting strength) の設計最小値、すなわち、設計最小強度は、限界強度のデータベースから単純に破壊確率を指標として、破壊確率が所定の値以下となる強度値として定義されている。一方、保証値の意味するところは、それを下回るデータが受入検査時に示されたならば、その材料は受け入れることができない。設計最小強度を合否基準とするのであれば、最小値を定義する確率で受入れ拒否の材料が存在することになる。たとえ、仕様書通りにまじめに製作したとしても。これは、突き詰めるところ、強度を受入検査の合否基準とするのであれば、それは、保証値でなければならない、単なる設計最小強度を保証値とするのは不適切である。

ところで、そもそも、破壊強度を受入検査の判定項目とするのは適切なものであろうか。脆性材の場合には、後述するように想定する破損モードは脆性破壊であり、脆性破壊を記述する機械的性質は、破壊強度よりも破壊靱性といわれている。

ここで、高延性な金属の場合を見てみると、強度を受入検査時の判定項目の一つとしている。高延性材では、欠陥を起点とする脆性的な不安定破壊による破損は特殊な使用条件（フェライト鋼で低温において、など）や特殊な構造条件に限られているが、その一方、塑性崩壊の防止を図るために限界強度として引張強さを考えている。また、バースト、あるいは、延性破壊の防止について、本来であれば対象とする限界強度は破壊強度であるが、引張強さが代用として使われてきている。破損防止のための限界強度としての引張強さの重要性は理解できたが、では、そもそも材料の性能を表し、あるいは、材料を特定するために引張強さは重要であろうか。金属の場合、引張強さは化学成分組成や熱処理による特性の変化を表す簡便な指標として用いられてきた。また、少なからずの材料では、引張強さが材料の性能目標の一つとなっており、その目標を達成できるように材料仕様を最適化している。

非金属でも、破壊防止は極めて重要な性能要求であり、そのための指標が必要であることは論を待たない。現状は、下記のことを考慮して、金属の考え方に準拠した形で破壊強度を指標としていると思われる。

- i) 材料の性能の決め手の一つである欠陥の直接測定が難しいこと。このため、設計段階において解析評価から得られる応力値に基づき応力拡大係数として議論できないこと。
- ii) 強度の高低と欠陥の大小とがよい相関があること（破壊靱性値が大きくばらつかなければ当たり前のことではあるが）。

- (2) 構造物を特定しない規格の考え方

3つの規格ともに、対象とする構造物を特定している。体積が大きくなればなるほどより大きな欠陥が存在する可能性が高くなり、脆性材の場合には破壊強度が低下する。また破壊強度は、製造方法に強く依存するだけでなく、強度測定のための試験片の採取位置にも大きく左右される。このため、構造物を特定し、さらに、その大きさや製造方法など強度のばらつきに影響を及ぼす要因の条件を限定した上で試験片採取位置も特定して破壊強度のデータベースを構築し、このデータベースから許容応力を策定している。

セラミックスの市場が限定されている今はこれでもなんとかやっていけるが、市場が拡大し、多方面に使われるようになると、そう簡単には済まされない。また、製造方法を限定するということは製造メーカーの限定につながることであり、市場競争原理に反する。現在のように個々の構造物について詳細な仕様と規格とをセットにしていちいち作るのか、あるいは、一般化を試みるかのどちらかを選択せざるを得ない。一般化する場合の最大のネックは、通常の市販品を使った前述の例を見るまでもなく破壊強度が著しくばらつくことである。解決策は後述するが、規格ではオーナーの要求としての保証値をベースにし、受入れ検査でこれが保証されれば製造方法などは製作メーカーの努力に任せるという思想に基づくべきと考える。

(3) 時間依存型破壊のデータのばらつきに関して、前提とする瞬時破壊（あるいは即時破壊）のばらつきの考慮の仕方

時間依存型破壊強度は、**Fig.3.1** の考え方に従えば、そのばらつきは瞬時破壊のばらつきの影響を受ける。本来であれば、瞬時破壊について設計最小強度の材料を用いた場合に時間依存型破壊強度がどうなるか議論する必要がある。しかし、3つの規格とも、その解説にはそのような説明は見当たらなかった。

3.4.2 考察

脆性材を用いた機器について健全性を確保するための考え方を構築する上で、次の視点を忘れてはならない。

a) 実機使用条件での破損モードを把握すること。

現状、セラミックスは多くの事故を経験しているわけではない。今後、いろいろなところで多種多様なセラミックスなどが使われていくことを考えると、これまでの少ない事故経験や実験室規模での検討からでは予測し得なかったモードの破損が出現する可能性がある。しかし、後述するように、破壊のプロセスとして **Fig.3.1** に模式的に示した初期き裂を起点とする、あるいは新たに発生するき裂を起点とする脆性破壊の概念は成立すると考えられる。

b) 脆性破壊の防止を合理的に図ること。

その脆性破壊を合理的な余裕をもって図ることが重要であるが、なにをもって合理的と考えるかが重要である。

c) 脆性破壊の原因となる実機製品における欠陥を把握すること。

ダイヤモンドは別にして、表面欠陥を把握することが特に重要である。ということは、素材を加工する段階で生ずる欠陥だけでなく、製品に成形し、接合などを施した後の欠陥も把握することが求められる。

d) さらに踏み込んで、合理的な強度設計ができるように欠陥など破壊に影響を及ぼす因子を

合理的にコントロールすること。

上記 3.4.1 節の (2) の課題として、なぜ現行の規格では材料や製造条件などを限定しているかという、前述しているように、欠陥レベルでの把握が十分にはできないため b), c) の視点で健全性の確保を図ることを考えることが難しいからと考えられる。このため、d) を達成するために、欠陥を作り出す源を限定しようと考えているからである。許容される欠陥のサイズが 1mm 以下では、特にそれが内部欠陥の場合には、現状の非破壊的な欠陥検出技術ではいかんともしがたい。だからといって製造方法を限定することが適切とは思われない。場合によっては、特定の製造メーカーに限定する言い訳を与えることになる。設計上、脆性破壊の防止という性能要求を課すことはオーナーとして当然のことではあるが、製造条件を限定するということは、建設を発注する段階で初めてメーカーを指定するのではなく、設計値を定めるためのデータベースを構築する研究開発段階において既にメーカーを限定してしまうことになるからである。研究開発段階で係ったメーカーが建設段階でも生き残っているかという問題もある。

これらの視点を考慮しつつ、健全性確保の考え方を構築するためには、そもそものような破損モードを想定すべきなのか、そして、課題(1)、(2)、(3)を解決しつつ破損防止を図るにはどうすればよいか考察する。

3.4.2.1 想定すべき破損モード

文献や現行規格の分析から、破損モードとして最低限、下記を想定する必要がある。

- (1) 上述したような、脆性破壊、すなわち、塑性変形をほとんど、あるいは全く伴わずに欠陥が不安定化することによる急速破壊（脆性的な不安定破壊）

少なくともマクロ的に塑性変形をほとんど生ずることなく、あるいは、全く生ずることなく、存在する欠陥が負荷応力での限界サイズに達して不安定化し急速破壊する、いわゆる不安定破壊である。破壊応力が降伏強さよりも低いから生ずると考えることができる。メカニズムとしては、基本的には、へき開面で分離する、へき開破壊である。完全に弾性的な完全脆性材では、塑性変形ゆえのエネルギー吸収効果が期待できない。この結果、き裂の進展を抑制する機構が存在せず、ひとたびき裂が生ずると急速にき裂が進展し、破壊に至る。

高強度セラミックスでは、この限界き裂サイズは想定されうる応力に対しては 1mm 以下である。このレベルの欠陥を製造過程などで発生させないことは現実的ではない。例えば、CVD ダイヤモンドでも、1年以上の長時間をかけて厚さ 1mm の円板に成長させる場合であれば、結晶が整然と成長し、欠陥がほとんどないと考えられるような透明なダイヤモンドを作製することができる。しかし、現実的に、3ヶ月程度で成長させると、ふぞろいに成長し、結晶がぶつかりあい、半透明になる。ぶつかりあったところに欠陥が生ずると考えられる。

一方、このような欠陥サイズは、現状の許認可に適用されている体積的な非破壊試験技術では検出することは難しい。従って、潜在欠陥を起点として脆性破壊が生ずることを想定する必要がある。

この脆性破壊の生じ方には、Fig.3.1 に示したように、2通りが考えられる。一つは、初期欠陥が最大応力に対応する限界サイズを越えているため、1回の荷重負荷（single load

application) で脆性破壊を生ずる。もう一つは、初期欠陥は限界サイズを下回っていても、環境効果や繰返し負荷などにより欠陥が進展し、あるいは、新たな欠陥を生じ、それが限界サイズに達して脆性破壊する場合である。

これらの欠陥が不安定化するサイズに達することによる破壊を防止する方策は、脆性材の場合には、よく知られているように、応力拡大係数が破壊靱性値を下回ることである。欠陥が、環境効果により、あるいは繰返し負荷によりき裂が進展することを考えると、設計耐用期間終了時に想定される欠陥サイズに対して破壊防止が図れるように負荷荷重を制限すれば初期段階から運転期間を通じての健全性は確保される。ただし、初期段階でのき裂サイズとその後の進展との間に複雑な関係がある場合などでは、これだけで良いのか、初期段階についても評価しておく必要はないのか、考察する必要がある。

(2) その他、想定されうる破損モード

弾性座屈の防止を図る必要がある。

高延性材で想定した、塑性変形するゆえに防止すべき破損モードは考慮する必要はない。

3.4.2.2 破損防止の考え方として、脆性破壊防止の考え方（とりわけ、3.4.1 節（1）の受入検査の位置づけ）

そもそも何をどのように考察すべきかからして検討しておくべきと考える。これは、脆性破壊防止を品質保証という観点からどう考察すべきか、ということになる。そこで、まず、品質保証のそもそも論をレビューし、脆性材の場合に、品質保証をどのように考えるべきか考察し、脆性破壊防止を考察する。

(1) 品質保証とは

脆性材を使用する機器、部品の破損防止として、脆性破壊の防止は最も重要な項目であることは論を待たない。

ところで、要求される性能を確保し、維持すること、これすなわち、品質保証である。要求性能としては、安全性の確保、経済性の確保、財産保護、さらには、発電プラントであれば日本においては電力の安定供給などがある。これら要求性能を別の観点から見たとき、一つには、破損防止であり、構造健全性の確保、維持がある。これまで、適切な品質を確保するための方策は、大きく、2段階で考えられてきた。これは、トータルとして保証する品質を、製作段階で確保する製品品質と、使用開始後に維持すべき信頼性とに分けて考えていることに対応している。第1の段階、すなわち、製品品質の確保とは、完成時に要求されている品質が確保されるように材料を購入し、製作するということである。この段階では材料メーカーや製造メーカーが品質保証のための一義的な責任を持っている。最終的な責任はオーナーであるが。第2の段階は、信頼性の確保、維持であり、所定の信頼性が維持されるように想定以上の経年劣化などを防ぐように使用するということである。一義的な責任は、運転の責任者であるオーナーにある。製品品質と信頼性は表裏一体であり、お互いが設計を通じて密接にリンクしている。設計が前提としている品質を確保するように、適切な品質の材料を購入し、適切な技術をもって製作する。それを確認するために検査(完成検査など)を行う。そして、設計としては、その品質(製品品質)が確保されていることを前提として（あるいは、どういう製品品質を確保すべき

かの要求を発する)、使用中に想定される荷重条件や環境条件を設計条件としてオーナーが定め、所定の品質(信頼性)が確保され、維持されるように設計者がシステム設計や機器設計などを行う。使用開始後には、設計で想定した荷重条件や環境条件が満足されるように運転、維持に努める。

上述した品質保証プロセスにおいて材料の受入検査は、構造健全性確保の観点から、購入する材料が、設計で前提とする品質を確保しているかどうかを検査するものである。

(2) 脆性材の品質保証

では、脆性材を使用する機器、部品の脆性破壊防止という要求性能を達成するためにはどのようにすればよいのであろうか。そもそも、製作段階で既に存在し、評価する必要がある初期欠陥が、使用中の環境条件により進展し、最終的に限界き裂長さに達するときに脆性破壊するという製作段階から使用中までを連続的に考えるべきシナリオの場合に、品質確保を2段階に分けて考えることが適切なものであろうか。

2段階に分けて考えることについては、製作段階の品質保証は製作者 (fabricator) が主体であり、それに対して、使用中の品質保証はオーナー (あるいは、所有者) が主体であることを考えると、脆性材についても2段階で考えるとどのようなようになるかを考察するのが適切であろう。

次に、脆性破壊防止のために保証すべき品質とは何であろうか。脆性破壊のメカニズムに立ち返って考えると、これまでも繰り返して述べてきたが、現状の加工技術では真に無欠陥はありえない。脆性材では破壊靱性値が低く、その一方で高強度セラミックスなどでは 100MPa を超える高応力が発生するような荷重負荷がセールスポイントであるため、潜在的に存在しうる欠陥 (表面欠陥だけでなく内部欠陥も) ですら脆性破壊の起点となりうる。すなわち、潜在欠陥が有害な欠陥である可能性がある。また、この欠陥、特に内部欠陥を非破壊的に検出することが難しい。高延性な金属と典型的に異なるところであろう。現在、微小な欠陥を検出しようとする努力が世界的になされているが、十分な信頼性を保証できるところまでは到達していない。

ここで、高延性材と比較しておこう。高延性材においても、欠陥は必ず存在する。しかしながら、品質管理を適切に行っていれば、存在しうる欠陥が不安定化して延性破壊を引き起こすことはない。すなわち、その欠陥は有害ではない。さらに、不安定化する欠陥の限界サイズより十分に小さい内部欠陥を検出することが可能である。

脆性破壊防止のために保証する品質とは、従って、製作段階で既に有害な欠陥が存在することを認めた上で、その欠陥を起点とする不安定破壊が生じないことと言えよう。使用中も含めてその欠陥が不安定化する限界き裂サイズを十分に下回ることと置き換えることもできる。この限界欠陥サイズの大きさは発生応力に強く依存し、さらには、破壊靱性値にも当然依存することから、評価すべき普遍的な変数として脆性材の場合には応力拡大係数なるものを考案している。これが材料特性としての破壊靱性値を十分に下回れば脆性破壊に至らない、というのが破壊力学の教えるところである。応力拡大係数の問題点はいろいろ指摘されているが(特に、疲労問題に破壊力学を適用する場合に問題が大きい)、他に代わりうる適切な力学変数がない

のが現状である。

(3) 脆性破壊防止の考え方

問題点の整理

欠陥を起点とする脆性破壊の要因を整理すると、既に広く知られているように、**Fig.3.2** のようになろう。応力拡大係数 K が不安定化条件を表す限界応力拡大係数 K_c に達することが脆性破壊の条件であり、限界応力拡大係数はすなわち、破壊靱性値である。破壊靱性については、その測定法がファインセラミックスの場合について JIS R 1607-1985 [3-16] に規定されている。測定法として予き裂導入破壊試験法 (SEPB 法) では、長さ 1.2~2.4mm の予き裂を試験片に入れて破壊するときの結果から破壊靱性値を求める。

Fig.3.2 において、破壊の駆動力となる応力は設計解析により定量化される。破壊靱性値となる K_c と製造段階での欠陥分布は、製品品質の重要な要因として使用前までに特定することが望まれる。このための検査は、材料受入検査や完成検査として行うことになろう。時間依存／サイクル依存破壊を想定する必要がある場合には、信頼性の重要な要因としてモニタリングや定期的な検査により破壊靱性値と欠陥分布を把握することが望まれる。このことは、裏返して言えば、繰返し述べているように、欠陥分布、特に内部欠陥分布を設計段階であらかじめ知ることが不可能であることを物語っている。では、どのように設計すればよいのであろうか。ひとつの解は、完成検査などで破壊靱性や欠陥分布を測定し、評価することと、そこで設定する合格基準を設計のベースにすることである。合格基準内で欠陥などが存在するとして、これを前提とした設計をすることである。損傷許容設計と称されている考えである（ただ、損傷許容という用語は、安心という観点からは望ましくない。欠陥制限設計という方が望ましいと著者は考える。高延性材機器に適用している有意な欠陥が存在しないことを前提とする設計 (defect-free design) に対応する用語として)。もう一つの解は、結果的にある範囲内に欠陥分布などが限定されることを意図して、製造プロセスや、場合によっては素材の原産地まで限定してしまうという方法である。その限定された欠陥分布などの範囲を前提として荷重や応力の許容される範囲を限定する。この場合には、設計段階では欠陥分布などについて検討する必要はない。

現状は、欠陥検出精度などの問題から後者の解を適用していることは既に述べてきたところである。 K_c と欠陥分布が暗黙に限定され、そのことにより脆性破壊強度のばらつきが抑えられる。これにより、合理的な許容応力の策定が可能になる。まとめると、脆性破壊防止という性能の確保は、現状では、品質としての直接的な因子を限定するのではなく、製造プロセスなどの条件を特段に限定することにより、破壊強度という、直接的な因子の従属変数を用いて図っている。具体的には、受入検査時に測定可能な破壊強度が、予め限定された条件で取得されたデータベースから定めた保証値を上回ることを求めている。これにより、必要な最小の破壊強度確保を可能としている。この方法の問題点は、「あらかじめ限定した条件」を材料仕様などとして一般化すること、規格化することが容易ではないことである。原産地を限定する材料仕様が規格として容認されるとは考え難い。

背景を長々と述べてきたが、組成や製造方法を限定して K_c と欠陥分布を限定することが本来的には適切ではないとしたら、合理的な設計を可能とし、適切な品質保証を図るには、なに

をどのように合理的にコントロールするのがよいのであろうか。それが 3.4.1 節で指摘した課題への答えとなる。

著者の考え

著者は、製造プロセス条件などを限定するのではなく、性能で規定する、すなわち、**performance demonstration** の概念に立脚すべきと考える。すなわち、インプットである製造条件側への規制を陽に定めるのではなく、アウトプットである要求性能のみをきっちり決め、それを満たしていることを証明することを条件とする。満たしているのであれば、適切な信頼性のある製造法であり、それを認めるという考え方である。なぜこのようなことを考えるかというと、実機製品から、あるいは、実機と同一の製造条件での模擬材から強度試験のためのサンプルを抽出するとしても、それで実機の欠陥特性を代表させていると結論付けるのは、脆性材ではなかなか難しい。ばらつきの原因があまりに多すぎる。従来、サンプリングで良しとできるのは、ばらつきの小さい高延性材なればこそと考える。脆性材では、とりわけ、表面欠陥が重要ということを見ると、製造条件などのインプットを押さえることは重要ではあるが、製品として完成する最終段階をきっちり押さえることを考えなければいけない。別途、実機全体に渡る欠陥特性の把握を非破壊的に行うべきで、それこそが、健全性という性能を保証するベースとならなければいけないと考えるからである。このため、欠陥を外部からの測定値として捉えることができる物理量を見出すことが極めて重要である。この物理量と欠陥分布との定量的な関係式から、要求される品質の水準を保証するための物理量の許容範囲を規定する。以上のことが、著者が考えることのエッセンスである。

詳細は次のように考える。脆性破壊を防止するということは、使用中に部品に存在する欠陥と破壊靱性値と応力の 3 要素が不安定破壊を引き起こす条件を適切な設計裕度をもって下回ることである。当然ながら、対策は、下記に尽きる。

- ① 高（破壊）靱性化
- ② 欠陥サイズの低減
- ③ 低応力化

あるいは、より積極的に、目標を定めての破壊靱性、欠陥サイズ、応力の制御を図る。

著者提案の意図は、①及び②については、材料メーカーや製造メーカーの能力、努力に負う部分が大きいことから、具体的にこれらをどうするかの詳細に強くリンクする規格として規定すべきはないということである。規格としては、性能規定にとどめ、その性能規定をどうするのが合理的かに腐心すべきと考える。この考えにおいて重要な役割を果たすのが、材料メーカー、製造メーカーの努力成果としての部品の品質水準を判断するための検査である。①については、破壊靱性を測定することに尽きる。破壊靱性は材料に固有なパラメータにより表すことができ、材料定数である。従って、材料の受入検査として測定する。問題は②である。欠陥と強い相関がある物理量を見出し、その検査を完成検査として実施する。脆性破壊を防止するための欠陥の設計最大値を定め、これを保証するための物理量の設計限界を設定する。注意しなければいけないことは、欠陥は極めて局所的な特性である。しかし、該当する物理量は、そこまで局所的に測ることができるか、ということである。ある程度、体積的に平均化した値として測定される場合には、欠陥の最大サイズとの対応をあらかじめしっかりと把握せざるを得ない。

3.5 構造健全性確保の考え方についての提案

3.5.1 欠陥の存在を前提とした既存の構造規格、及び脆性材の欠陥検出

ここで提案しようとする考え方は、欠陥の存在を積極的に認識し、欠陥ありきで考えようとする。ところで、欠陥が存在し、それが破壊の起点となりうる、いわゆる潜在的に有害な欠陥を内包する部品や機器について、欠陥を認識したうえで構造健全性を維持する考え方は既に一部で規格化されている。それは、金属製機器において使用中に欠陥が発生し、有害な欠陥に成長する場合の規格であり、FFS (Fitness For Service) の規格として知られている。いわゆる維持規格である。FFS とは、API 579[3-17]を参考にすれば、次のように定義される。

“Fitness-for-service is defined as the ability to demonstrate the structural integrity of an in-service component containing a flaw or damage”

FFS の概念は、そもそも、金属製機器において使用中に欠陥が発見された場合の対応（そのまま運転続行するか、修理するか、交換するか）を決定するために考案された。しかし、繰り返して議論してきたように、材料加工や製造プロセスにおいて欠陥が生じることは避けることができず、脆性材においてはこの欠陥すら有害と考えざるを得ないことである。

API 579 には 3 つの健全性評価手法が示されているが、現実的な手法は、レベル 2 と称するものである。それは、FAD (Failure Assessment Diagram) を用いた健全性評価手法である。FAD は、破壊として脆性破壊だけでなく、延性破壊も対象としている。今は脆性材を考えているので脆性破壊に限定すると、それは、Fig.3.2 に示した応力拡大係数による評価手法である。あらかじめ存在する欠陥が破壊の起点となり、欠陥が不安定化するかどうかは応力拡大係数が破壊靱性値よりも大きいかどうかで判断する。この評価手法の信頼性は、欠陥の検出確率によって決まるため、API 579 においても、欠陥の検出確率が重要視されている。

なお、第 4 章との関係もあるのでここで言及しておく、延性が高い場合に起こる延性破壊は、初期欠陥を起点とした破壊ではない。塑性変形の結果として介在物等で剥離などによりボイドが発生し、成長して合体し、そして、ボイド間に形成されるリガメントでの応力集中により最終的にせん断型の破壊が生ずると考えられている。

脆性破壊評価手法の信頼性は、欠陥の検出性能、とりわけサイジング性能に左右される。現状、脆性材の健全性評価に必要な欠陥検出精度は、約 $10\mu\text{m}$ といわれている。内部欠陥の検出を主な目的としている超音波探傷法では、発信する音波の周波数は、対象が金属の場合には 2MHz あるいは 5MHz である。周波数を上げれば上げるほど検出精度はよくなる（検出限界サイズを小さくすることができる）が、材料中での音波の減衰が大きくなる。しかし、セラミックスなどの脆性材を対象とする場合には、薄肉構造ということもあり、上記の欠陥検出精度をクリアするために、15MHz 以上の高周波数が考えられている。日本非破壊検査協会では、平成 11 年 3 月に、NDIS 2420「パルス反射法による高周波超音波探傷試験通則」[3-18]を定め、15MHz 以上 100MHz 付近までを対象として水浸用集束探触子を用いる方法を推奨している。

このほか、放射線透過法では、X 線発生点が $10\mu\text{m}$ 以下となるように絞った X 線管球を用いたマイクロフォーカス X 線探傷法がファインセラミックスセンター (JFCC) で開発されている。さらに、表面欠陥については、超音波探傷法で、ある入射角で超音波を斜め入射させると漏洩弾性表面波が発生することを利用した探傷法などが提案されている[3-19]。

実用化までにはまだまだ検討すべきことが少なからずあるが、着実に進展することを期待したい。

3.5.2 脆性材部品の構造健全性確保の方法についてあるべき姿の提案

(1) 基本方針

対象とする脆性材の部品には潜在的に有害性のある欠陥が存在するという認識に立ち、脆性破壊（脆性的な不安定破壊）と弾性座屈を適切な裕度をもって防止する。具体的には、脆性破壊の防止については、有害な欠陥の不安定破壊のし易さを表す指標として応力拡大係数 K を考え、これが脆性材の不安定破壊を限定する特性（限界特性、limiting property(or strength))である破壊靱性値 K_c を適切な裕度をもって下回ることとする。すなわち、

$$\alpha K \leq K_c \quad \text{あるいは} \quad K \leq K_c / \alpha$$

α : 設計裕度（あるいは設計係数。昔の言い方では安全率）

この評価に当たっては、環境効果や繰り返し荷重効果による欠陥の発生や成長を考慮する。即ち、模式的には、**Fig.3.1** を考え、初期段階だけでなく設計寿命時点においても最終欠陥サイズが限界欠陥サイズを十分に下回るようにする。

重要な考え方として、脆性破壊は、**Fig.3.2** に示すように、破壊靱性、欠陥のサイズ、形状と分布、並びに、応力が絡んでいるので、応力制限、あるいは、欠陥の抑制だけでなく、これら三者を有機的に制御することが重要である。とりわけ、脆性破壊の防止を図る上で最も難しい問題は、作ってはじめてわかる欠陥の情報を設計段階で予め予測しなければならないことである。この難問の解決を設計に押し付けるのではなく、他の要素、例えば、検査などが密接に連携することが重要である。

なお、応力拡大係数の使用に当たっては、欠陥検出確率の問題や疲労評価における問題など、まだ未解決の問題があることに留意する必要がある。例えば疲労評価では、平滑材の疲労寿命を分析すると、その大部分でき裂進展が始まっておらず、進展し始めるのは、例えば高サイクル疲労の場合には疲労寿命の 9/10 位からである。破壊力学的な評価が可能なのは、したがって、この残り 1/10 の寿命に対して、ということである。維持規格においては、この問題は考慮不要であるが、設計の合理的な手法として使おうとすると問題となる。

(2) 設計段階での要求事項

単純に考えれば、欠陥のサイズ、形状、分布について想定されうる最悪のシナリオを設計対象とすれば、検査の厳しさは緩和できよう。しかし、そのような最悪のシナリオとして設計が成立しうる解は、相手が脆性材である限り存在しないであろう。設計が前提とする欠陥の最悪条件（サイズ、形状、分布など）は、これまでの実績などをベースに限定したシナリオとして定めるべきと考える。どう保証するかは、検査の項で述べる。ただし、解決すべき問題は、初期欠陥の場合すら大きい。これが、時間依存、サイクル依存となると、相当に複雑になる。時間依存、サイクル依存の場合の現実的な解決方法は、初期欠陥条件に対し、ある係数で減じることであろう。

最終的な設計受容性（design acceptability）の判断の仕方としては、次のような2通りが考えられよう。

- 1) 設計が前提としている最悪の欠陥条件シナリオ、並びに、応力解析の結果から応力拡大係数 K を求め、 $K \leq K_C / \alpha$ を満たすことを示す。
- 2) $K \leq K_C / \alpha$ 、並びに、最悪の欠陥条件シナリオから、許容応力 $\sigma_{\text{allowable}}$ を求め、応力解析結果が $\sigma \leq \sigma_{\text{allowable}}$ を満たすことを示す。

ただし、いずれも、初期欠陥や初期値だけでなく、使用中における欠陥の進展や時効劣化などを考慮する必要があることは当然である。

(3) 製造段階（材料加工・製作）段階での要求事項

設計で前提としている材料の品質、そして部品としての製品品質を確保するための要求事項を規定する。

要求事項の考え方を提案する前に、まず、そのあるべき姿勢を議論する。本来的に材料に固有な特性である破壊靱性の制御、並びに、素材の作製（材料加工）や製造段階で生ずる欠陥の制御に関しては、どのように制御するかは材料メーカー、製造メーカーの責務であり、また、セールスポイントでもある。このことを考慮して材料の規格は、組成成分、製造プロセスなどの適切なパラメータについて材料に要求される機能を発揮するための拘束条件を一般性のある形で合理的に規定するのが望ましい。しかしながら、構造健全性を確保するためには、一般性のある要求事項を定めている材料規格に従って加工された材料を受け入れることで十分とは、必ずしも言えない。それは、どのレベルの健全性を求めるかは部品によって、あるいはその使われ方によって異なるからである。破壊靱性や欠陥の制御に関してより厳しい要求を付加しなければならない場合がある。ここで留意しなければいけないことは、付加するにしても、構造健全性を確保するための要求としては、破壊靱性の制御、並びに、欠陥が制御されるべき範囲を直接的に、あるいは、間接的には局所的な欠陥特性と強い相関がある他の物理量により規定するにとどめるべきである。製造プロセスなどをさらに厳しく限定することは望ましくない。また、要求規定を満足しているかの検査についても、本来的には、検査の要求性能と合格基準を規定するにとどめるのが望ましい。

欠陥の非破壊的な検査については、文献等によると、これまでの努力の結果、可能性が見えてくるところまで到達できていると思われる。間接的な方法については、これまであまり議論されてきていない。しかし、著者が推測するに、例えば、CVD 人工ダイヤモンドでは、 $\tan \delta$ などが局所的な相関が期待される（板厚方向には積分になってしまうが）。

設計が前提としている材料の品質、そして部品としての製品品質を確保するための要求事項は、これまでの議論から明らかなように、以下の2項目である。

- 1) 破壊靱性値が K_C 以上であること。
- 2) 欠陥条件が、最悪シナリオを超えないこと。

まず、 K_C については、部品材の破壊靱性を測定して、少数サンプリングの考え方に基づき、ある推定確率での最小値を推定する。その際に、下記のことに留意する必要があることは当然である。（なお、黒鉛では、製造プロセス条件などを限定し、予め多量に取得したデータから求めたデータのばらつきの因子定数はサンプリング時にも変わらない、という考え方を採用しているが、必ずしも一般的ではない）

○どの材料から採取するのか

- イ) 加工する素材
- ロ) 部品の余丁部
- ハ) 同一加工条件で作成された試料
- ニ) そのほかの模擬材

○どの位置からサンプリングするか

通常であれば、予め測定したデータから最弱箇所での値を測定点に含めることが望ましい。

○ロット間のデータのばらつき (lot-to-lot variation)、など、データをばらつかせる原因

次に、欠陥条件が最悪シナリオを超えないことの証明である。これは、測定法自体の問題はこれまで言及してきたとおりであるが、もう一つ大きな問題として、最悪シナリオを超える K 値となる欠陥を見逃す確率である。破壊力学を設計として用いる場合の問題点がいくつか指摘できるが、そのうちの重要な問題点の一つである。この解決策はいくつか考えられるが、現実的な方法としては、検査手法に多様性を持たせることであろう。特に、これまでに述べてきたように、局所的な欠陥特性を把握できる他の物理量での測定は多様性として大きな意味がある。とりわけ、見逃す原因として挙げられる欠陥の方向性や重なりなどに対し、異なる見方をする測定方法は重要である。

(4) 使用段階

信頼性の確保のために必要な監視、または定期的な検査、並びに、有害な欠陥と判断された場合の部品交換の必要性などを規定する。

応力や欠陥条件、破壊靱性値は分布を含めて既知となっていることから、設計で想定した最悪シナリオの欠陥条件を超える欠陥が発見された場合に、即、交換するという必要はない。その欠陥に対して想定している応力拡大係数を、そこでの応力から求まる応力拡大係数が超えている場合に交換すればよい。

問題は、監視、すなわち、モニタリングの方法である。AE (Acoustic emission) が現実的と考えられるが、対象とする欠陥が微小なだけに、試行錯誤が必要であろう。

(5) 接合部

脆性材と脆性材の接合部もあるが、脆性材と延性の高い金属との接合部がクリティカルである。それは、熱膨張率の違いなどに起因する変形制御型の応力が接合部に生じ、これが部品中で最大応力となる場合が多いためである。さらに、例えば、ロウ付けの場合を考えると、欠陥として、ロウと脆性材との接面での剥離だけでなく、ロウ部で生じる欠陥も脆性材にとっては予き裂として作用する場合があります。すなわち、脆性材に対する欠陥の起点を形成する可能性がある。

このような欠陥の発生を防がなければならないが、それを確認するための欠陥検出について、脆性材、ロウ部、さらには金属と特性が全く異なる 3 種類の材料を通して欠陥を検出し、サイジングするのは相当に難しい。しかし、脆性材を実用化するためには避けて通れない課題である。解決策としては、可能であれば、機械的な締結とせざるを得ないが、不可能な場合には、朝田泰英博士が提案した検査フリー溶接施工技術に相当する接合技術の開発が必要となろう。

以上が、現状の知見や経験に基づいた、脆性材の構造健全性確保の考え方についての著者の提案である。3.3 節で分析した、黒鉛などの脆性材に適用している構造規格の考え方はちゃんとした背景があつてのことであるが、今後の市場発展性を考えると、提案として示したような、相当に汎用的な考え方に変えていく必要があると考える。提案の中でも言及したが、当然、解決すべき課題の障壁は相当に高いことは言うまでもない。

Table 3.1 Maximum allowable crack sizes in several brittle materials for preventing brittle fracture

Material	Fracture toughness at Room Temp. K_{Ic} in $MPa\sqrt{m}$	Maximum crack size, a_f , for minimum fracture strength σ_f		Maximum crack size, a_A , for draft allowable limit $\sigma_A=\sigma_f/3$	
		σ_f in MPa	a_f in mm	σ_A in MPa	a_A in mm
Alumina	$\doteq 4$	$\doteq 200$	$\doteq 0.1$	$\doteq 70$	$\doteq 1.0$
CVD diamond	$\doteq 8$	$\doteq 300$	$\doteq 0.2$	$\doteq 100$	$\doteq 2.0$
Single crystal sapphire	$\doteq 2$	$\doteq 200$	$\doteq 0.03$	$\doteq 70$	$\doteq 0.3$
Quartz glass	$\doteq 0.7$	$\doteq 70$	$\doteq 0.03$	$\doteq 25$	$\doteq 0.3$

Table 3.2 Weibull coefficient m and fracture strength σ

m	$\sigma/\bar{\sigma}$
30	0.794
20	0.695
10	0.483
5	0.233
3	0.088

Table 3.3 Concepts of design criteria for structural components or parts of brittle materials

Material	Component or parts	Failure mode	Stress to cause the failure	Limiting strength	Concept of preventing the failure	Definition of design minimum strength	Design Factor
Graphite [3-11]	HTGR core support structure and core structure	Instantaneous fracture	Primary+secondary stress (principal stress) σ	Ultimate strength (tensile or compressive fracture strength) σ_u	$\sigma \leq \frac{\sigma_u}{DF}$	σ_u is derived as the survival probability of 99% at the confidence level of 95%	3, referred to metal design criteria
		Delayed fracture	Total stress (principal stress) T	Fracture strength under environmental condition	$T \leq \frac{0.9\sigma_u}{DF}$	Similar to σ_u	(Not identified)
		Fatigue cracking	Total stress amplitude	Fatigue life N_f	$N \leq N_f$	(Not identified)	(Not identified)
Fine ceramics [3-13]	Gas turbine	Instantaneous fracture	Total stress (principal stress) T	Instantaneous fracture strength	Maximum effective stress : $\frac{\sigma_u}{\sigma_{max}} \leq \frac{1}{DF} = \frac{1}{K_1 K_0 \beta} \frac{\sigma_u}{\alpha}$	The specified minimum strength S_u is defined as the survival probability of 99%, and is derived by $S_u = S/\alpha$. α is a function of Weibull modulus.	$K_1=3$, for level A&B loading for class 1 components
		Time-dependent fracture by slow crack growth	Total stress (principal stress) T	Time dependent fracture strength derived from fatigue strength	Maximum effective stress : $\frac{\sigma_t}{\sigma_{max}} \leq \frac{1}{DF} = \frac{1}{K_1 K_0 \beta} \frac{\sigma_t}{\alpha}$	The specified minimum time-dependent strength S_t is derived from design fatigue curves.	The same as S_u

Table 3.3 Concepts of design criteria for structural components or parts of brittle materials (cont'd)

Material	Component or parts	Failure mode	Stress to cause the failure	Limiting strength	Concept of preventing the failure	Definition of design minimum strength	Design Factor
FRP (glass-fiber reinforce thermosetting resin) [3-14, 3-15]	Chemical-Resistant tanks	Fracture-Related Failure	Total (principal stress) T	Fracture strength	$f = \frac{F_L}{F} \geq \sigma$ f : allowable stress. F _L : limiting strength,	For tensile strength F _T as the limiting fracture strength, F _L =0.7F _T , and F _T is derived as the survival probability of 99.9%.	Minimum 3.0
		Permanent deformation (rigidity) - related fracture (buckling)		Rigidity	F : design factor, σ : applied stress (Not identified)		Minimum 2.5

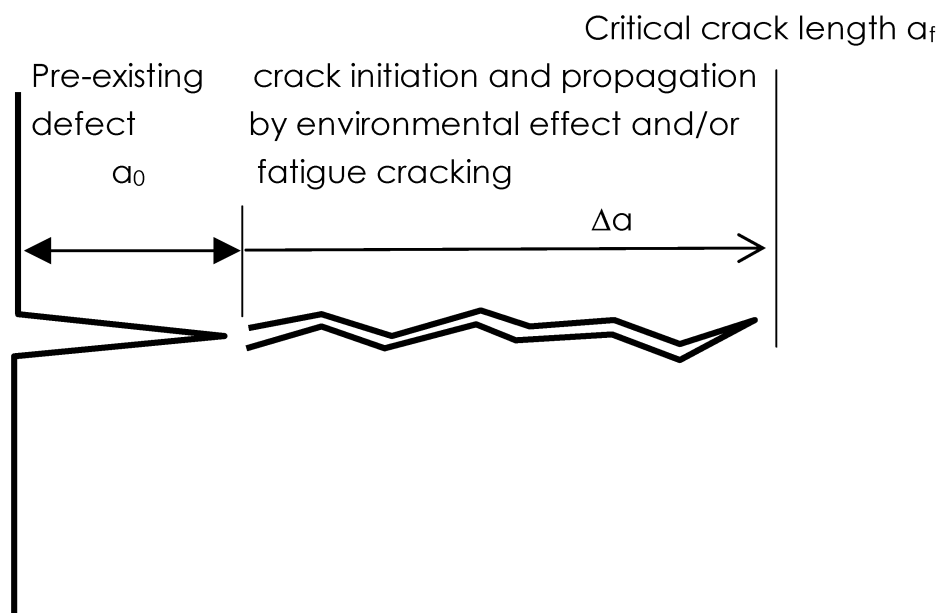


Fig. 3.1 Schematic illustration of brittle fracture mechanism

Brittle fracture = Unstable fracture at no or insignificant (small) plastic deformation

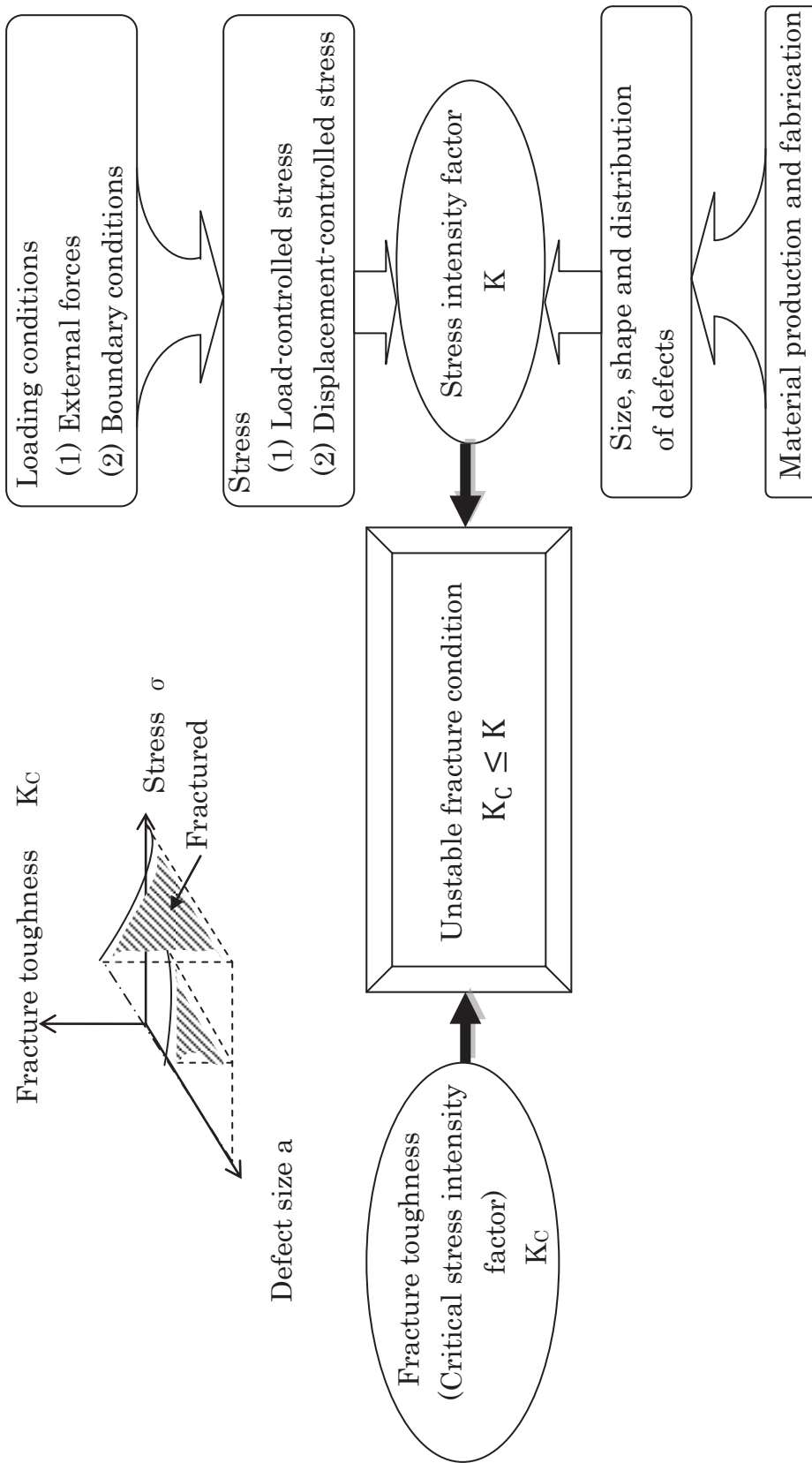


Fig.3.2 Schematic illustration of factors to cause brittle fracture

4. 中間的な延性材機器の健全性確保の考え方、並びに、 体系化についての考察

第2章に述べたように、高延性材機器の健全性確保については20世紀初頭からの十分な経験があり、経験をベースとした規格の高度化が着実に進展している。しかし、使用条件が苛酷になってきており、高延性材だけ考えていけばよいという時代ではなくなっている。セラミックスなどの脆性材も、それが有する魅力的な機能性ゆえに脆性材というハンディーを乗り越えて強度部材としての使用が期待され、第3章に示したように規格化が始まっている。その一方で、使用条件の苛酷化は金属材料の高強度化、高性能化を求めており、この結果、高延性材とは言い難い材料も使用されるようになってきた。典型的な例が、1960年代からの300MPa(3000気圧)を超える超高压容器用に開発された高強度鋼である。

さらに、使用期間の一層の長期化も求められてきており、その結果、経年変化に係る問題を除けて通れなくなっている。とりわけ、材料特性が大きく変化する場合が現実となっていており、高延性と言われる範疇を下回る場合が出現してきている。

このように、高延性というには足りないが脆性材というほどには延性が低下していない材料、ここでは「中間的な延性材」あるいは「中間延性材」と称するが(いわゆる、中／低延性材のこと)、これらの材料を使用する機器の構造健全性確保のあり方を考えなければいけなくなっている。

高延性といわれている材料特性からはずれると、どのような特性を示すようになるのであろうか、また、どのような破損が想定されるのであろうか、健全性確保を考えていく上でどのようなことを考えなければいけないのであろうか。これらのことを考察し、健全性確保の考え方を確立していくためには、どのような思想、基本方針の下で考えていけばよいのか、検討してみたい。

なぜ今の段階でこのようなことを検討するかというと、第1章でも触れたように、この中間的な特性の場合にどう考えるかを検討するにとどまるべきではなく、一貫した体系的な思考が必要と考えるからであり、さらには、この体系的な思想は、高延性材機器の規格の高度化や脆性材部品の規格の開発を考えていく上で役立つと考えるからである。

4.1 体系的に考えることの必要性

システムあるいは機器、部品などに要求される機能、たとえば、安全性の確保、さらには、エネルギー生産システムにおいては効率的なエネルギー生産のための気密性や伝熱性能の確保など、を確保するためには、オーナーは製造者などと協力して、機器などの破壊を防止するだけでなく、気密性確保のための漏えい防止、さらには、ある程度の変形が許容される場合にはそれを超える過大な変形の防止などを図らねばならない。構造健全性の確保とは、これらの破損防止を合理的な裕度をもって図り、この結果として、要求される機能を適切な裕度をもって確保することである。この防止すべき破損モードは、使用する材料が高延性であるか脆性であるかによって異なることは前章までで議論してきたところである。

さて、高延性材、脆性材以外の材料特性のことを考えなければならない場合に、どのような特性になるのか、それ故にどのような破損モードを想定すればよいのであろうか(想定される主た

る破損モード（設計上考慮しなければいけない破損モード）は使用条件によっても変わるが、そこまで考えなくとも）。従来は、材料特性が大きくは変化しないことを前提とし、また、高延性材と脆性材ではその特性が大きく異なることから、材料の有する特性を高延性材に限定して、あるいは、脆性材に限定してその構造健全性確保の方策を考えてきた。しかし、それでは早晩立ち行かなくなり、技術革新に追い付いていけなくなる。材料特性の変化、ひいてはそれによる想定する破損モードの変化を体系的に考えるのが、結局は合理的である、というのが、第1章にも述べたように、著者の主張するところである。それは、使用条件が苛酷になってきたことなどから、体系的に考えることが必要性としてだけでなく、必然性として求められつつあるからである。

繰り返しになるが、使用条件の苛酷化から、高延性な金属材料だけでなく、脆性材、さらには、その中間的な特性を有する材料というように多様な材料を、強度部材（load-carrying element）あるいは load-bearing element）として用い、その構造健全性確保を考えなければいけなくなっている。このことに加えて、金属材料の使用条件を考えてみても、使用範囲の拡大化から、限界に近いような条件でも使われるようになってきている。この結果、使用中に高延性の範疇を逸脱するような材料特性に変化する場合が現実問題として生じている。このような材料特性の存在は、炭素鋼や低合金鋼の場合に、温度を下げていくとどうなるかを思い出していただければ納得できよう。最低使用温度という概念が徹底している読者から見れば「そんな特性では使わないぞ」と反論されそうであり、現実には現行の構造規格では使用中における機械的性質の変化が大きくなならない材料を選定することをオーナーの責務として求めている。しかしながら、中性子照射しかり、熱時効しかり、使用条件の苛酷化に立ち向かおうとすれば避けて通れない問題となってきた。このための対策として、ある部位について運転中に受ける温度によって材料を取り換えるなどということは現実的には考えにくいので、上述のような材料特性の変化を必然的に考慮せざるを得ない。

ということで、体系的に考察することを意識しつつ、中間的な材料特性を示す材料を用いる機器の構造健全性確保の考え方を考察してみる。

なお、上述においては材料特性あるいは機械的性質と一言で括ってしまっているが、構造健全性を議論する場合に考えなければならない機械的性質としては具体的には、主として下記が挙げられる。

- ・強度（strength）
- ・延性（ductility）（これは、変形性能（deformability）を表す指標として）
- ・切欠き靱性（あるいは切欠き延性）（notch toughness or notch ductility）

4.2 中間延性材の機械的性質についての考察

4.2.1 破壊

そもそも、どのような破壊の仕方があるのであろうか。このレビューから始める。その上で、中間延性材に想定される破壊の仕方を考察し、構造健全性確保を考える上でどのような破壊を考えればよいのか検討する。なお、ここでは、単一負荷時（single load application）に生ずる破壊を考える。

最初に、破壊の仕方についてどのように分類できるかをレビューし、次に、破壊と延性との関係、破壊に至るプロセスが荷重条件によって異なることを述べる。この、荷重条件によって破壊に至るプロセスが異なることが中間延性材機器の構造健全性を考える上で非常に重要となる。そして、高延性材機器で想定している破壊は延性破壊であるが（脆性破壊の可能性がある温度条件では使用しない）、構造健全性確保の観点からどのようにそれを定義しているかを検討する。その上で、中間的な延性材の機器の場合の破壊をどのように考えればよいのか考察する。

破壊の分類

横堀の解説[4-1]によると、破壊は結晶学的な観点から次のように分類されている。

○結晶粒内破壊

□へき開破壊：へき開面にそった破壊

□せん断型破壊：すべり面にそった破壊

○結晶粒界破壊

ここで、よく混乱すると指摘されていることが、脆性破壊は結晶学的にはへき開破壊であり、延性破壊はせん断型破壊と対応させてしまうことである。これは正しくない。もともと延性破壊か脆性破壊かは、破壊までのひずみ又はエネルギーで分類したものである。延性破壊とは、「ある程度以上の塑性流動（塑性変形）を伴う破壊」の意として称されている。一般的には、破断時の断面収縮率（絞り）が数%以下の場合を脆性破壊と称し、それ以上を延性破壊と呼んでいるようである。

結晶学的な分類と破断時の塑性流動による分類との関係をみると単純ではない。へき開破壊といっても、破壊までかなりの塑性変形を生じる場合がある。へき開破壊を引き起こすへき開き裂の生成には、それまでに生じる塑性変形の大小により次のような3つのメカニズムが考えられている[4-2]。

へき開破壊の分類（へき開き裂の生成と塑性変形の関係）

（1）タイプー1

降伏強さよりも低い応力でき裂が進展するほどに予き裂（pre-existing cracks）が十分に大きい場合

（2）タイプー2

破壊の前に降伏が生じ、すべり帯（slip bands）あるいは双晶（twins）によりへき開の核が生成する。このすべり帯あるいは双晶は粒界あるいは第2相粒子によりブロックされうる。

（3）タイプー3

塑性変形の結果粒界にき裂が生成する。安定に進展し、ある限界長さでへき開き裂と

して進展する。

炭素鋼などは低温において脆性的に破壊する。確かにへき開破壊ではあるが、よく調査すると、上記タイプー2、タイプー3のような延性のある延性へき開破壊とタイプー1のようなほとんど塑性変形を生じないで破壊する脆性へき開破壊があることがわかる。へき開破壊イコール脆性破壊ではない。

ところで、このように分類される破壊はどのような条件で発生するのであろうか。いまだに簡単に答えられるところまで説明はされていないようであるが、単純には次のような説が提案されている。それは、第2章と第3章でみてきた場合、すなわち、き裂先端に大規模な塑性変形が生じる延性破壊の場合と完全に弾性的に破壊する完全脆性破壊との区別である。き裂先端の最大引張応力 $\sigma_{\max}$ と最大せん断応力 $\tau_{\max}$ との比 $\sigma_{\max}/\tau_{\max}$ と、当該結晶の理想的へき開破壊強度（原子結合の破壊に要する応力） σ_{th} と理想的せん断強度 τ_{th} との比 $\sigma_{\text{th}}/\tau_{\text{th}}$ との関係で考えることができるとしている[4・3]。ここで、理論的強度はそれぞれ、次のように表わされる。

$$\sigma_{\text{th}} = \sqrt{\frac{\gamma_s E}{a}} \cong \sqrt{\frac{E}{10}} \quad (4.1)$$

$$\tau_{\text{th}} = \frac{b}{a} \frac{G}{2\pi} \cong \frac{G}{2\pi} \quad (4.2)$$

ここで、 a 、 b はすべり方向に垂直方向及びすべり方向の原子間隔を表す。 $\sigma_{\text{th}}/\tau_{\text{th}}$ が小さくて $\sigma_{\max}/\tau_{\max}$ が $\sigma_{\text{th}}/\tau_{\text{th}}$ より大きい材料では完全脆性破壊になる。一方、 $\sigma_{\text{th}}/\tau_{\text{th}}$ が十分に大きいと延性破壊となる。

破壊と延性との関係について

結晶学的な観点からは、粒内破壊についてへき開破壊とせん断型破壊に分類しているが、これが脆性破壊と延性破壊に1対1に対応してはいない。

しかしながら、破壊に至る欠陥の進展のし易さ、あるいは進展の不安定化と延性の関係を見ると、もう少し単純に考えることができると思われる。即ち、破壊までに塑性変形がある程度以上に生ずるのであれば、第2.2節で述べたように、塑性変形によるき裂進展の不安定化抑制効果から、塑性変形が初期欠陥を“無害化”する効果があると喩えることができよう。欠陥の進展が不安定化するためには、ある程度以上の欠陥サイズ、あるいは、相当のエネルギーやひずみが必要となる。従って、靱性が高くなる。非破壊検査で検出できる欠陥サイズの数倍くらいまでは不安定化する可能性が低いので、初期欠陥の検出性に関して大きな欠陥を見逃す可能性を脆性材ほど神経質になる必要はない。

それに対して、降伏強さがへき開強度よりも大きく、欠陥先端に塑性変形を生ずることがなければ、塑性変形による進展抑制効果を期待できず、小さな初期欠陥であっても不安定に進展してしまう可能性が高い。このような場合には、小さな欠陥であっても“有害”と考えなければいけない。

以上のことから、破壊の重大性（例えば、破壊した時の影響や、許容応力を超えて負荷した時の破壊のし易さ、など）を初期欠陥の重大性という視点で考えるとき、延性は少なくとも一つの重要な指標と言えよう。

荷重タイプにより破壊に至るプロセスが異なることについて

現行のプラント機器の多くは耐圧機器である。圧力は、基本的には外力により誘起される荷重 (force-induced loading) である。従って、圧力により機器の部材内に生ずる応力は、一般的には (構造不連続部を別にすれば) 圧力に力学的に平衡する load-controlled stress である。ただ、圧力の場合には、圧力制御系のことを別にすれば、圧力 (内圧) により膨らむ (ballooning) と機器内容積が増え、圧力が下がる。

一方、機械試験として規定されている引張試験では、単純形状の試験片に 1 軸引張荷重を負荷する。この荷重条件では、十分に延性が高い材料の場合、真応力-真ひずみ関係において $\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma$ となる勾配のところで硬化 (応力増分) と軟化 (断面積縮小分) が平衡し、これ以上は軟化が上回ってしまうため引張荷重を増やすことができない最大荷重点となる。さらに、ここでくびれが発生する。最大荷重点となってしまうのは、引張荷重により試験片断面内に生ずる応力が一様であり (くびれると一様ではなくなるが)、一様に塑性変形するからである。(不均一であれば、応力の再配分に期待でき、軟化を抑制できるのであるが。) さらに、くびれ始めて、それ以上に変形が進行する場合には、くびれ部に塑性流動が局所化し、くびれ部の断面が絞られ続けることになる。そうすると、このくびれ部の真応力がますます高応力化し、結晶内で大きく変形することで、ついには、介在物などが破壊あるいは剥離し、ボイドの発生、引き続く成長、ボイド同志の合体へと進む。ボイド間のリガメントでの応力がさらに高くなり、遂には、真のせん断破壊応力に達するか、他のメカニズムなどにより破壊に至る。このことは、引張試験の荷重-変位曲線を補正して得られる真応力-真ひずみ曲線における破壊応力もこのリガメントにおける破断時の真の応力ではなく、リガメントにおける破断時真応力はもっと高いことを意味している。

圧力の場合には、1 軸ではなく、多軸負荷となるが、断面内の応力分布はほぼ一様であり、引張荷重と同じような変形挙動をたどる。

しかしながら、荷重タイプによっては $\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma$ に達しても塑性不安定化せず、くびれに至らない場合もある。それは、断面内での応力分布が不均一であり、塑性変形が進展すると応力の再配分が可能であること、あるいは、弾性核 (elastic core) が存在するからである。典型的な例として、曲げモーメントを受ける矩形梁を考えてみよう。最外壁要素 (outermost fiber element) が $\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma$ に達しても、その内側はまだ達していない。ましてや、中央部はまだ弾性域にある。もっとも重要なことと思われることは、梁がある程度以上に長ければ、曲げ断面の平面保持状態が成り立っていることである。この結果、最外壁要素自身も不安定に (あるいは、無制限に、unbounded) 変形が進行してしまうということはありえない。では、この場合の破壊はどのように考えればよいのであろうか。もし、材料が加工硬化 (ひずみ硬化) せず、弾完全塑性体の場合には、降伏強さ以上には応力が増えないため、曲げモーメントが増えていくと応力再配分の結果、より一層内側に (中央部に) 塑性域が進展し、遂には弾性核も消滅し、完全塑性域となる。これを塑性ヒンジが形成されたと称するが、この状態になるとモーメントを増さなくても曲げ変形が無制限に進行してしまうため、これ以上の曲げモーメント負荷は不可能となる。現行の構造規格は、応力-ひずみ関係として非常に保守的に弾完全塑性体を考え、この塑性ヒンジが形成されるモーメント

に着目している。しかし、加工硬化材では、このような塑性ヒンジの形成は考えられず、曲げモーメントを増さなければ梁は曲がっていかない。そして、ある程度塑性変形が進行したところから、表面からき裂が生じ始めるようである。後述する論文によると、分岐がまず圧縮側に生ずるが、無制限に曲げ変形が進展するという塑性不安定は生じないようである。

この曲げモーメントと同じように、ある点での応力-ひずみ関係は塑性不安定条件を満たしていても総体的な塑性不安定にならない荷重条件としては、ねじり、など結構一般的に存在する。そこで、構造規格では、塑性不安定とは別に、塑性崩壊という破損モードを考え、主要部分が有意に塑性変形した場合と定義している。

構造健全性確保の観点からみた高延性材機器での破壊

結晶学的な観点からみた破壊の仕方と、破壊に至るまでの塑性変形量（塑性流動）との対応は単純ではないが、構造健全性の確保を考える上では、破壊をどのような観点から考察すれば（抽象的な言い方をすれば、どのような「イメージ」を描けば）よいのであろうか。端的に言えば、破壊のイメージが異なれば破壊防止の方策も異なるのが自然であろう。これを個別に考えているのではなく、体系化して考えていくことが必要になってきたというのが、本研究が意図するところである。

検討しやすいところから、十分に実績がある高延性材機器について、破壊をどのように考えているのであろうか。どのように考えているかはっきりすれば、規格化していく上で前提としてよいことが導かれる（逆説的には、破壊防止策を考える上での問題点や条件を限定して考えることができる）。このような観点から以下では検討してみる。

中間的な延性材を使用する機器（あるいは、経年変化により中間的な延性の特性を示すようになる材料を使用する機器）における破壊防止を考察するということは、まず、この「高延性」の破壊イメージがどこまで当てはまるか、どこから異なるかを考えることを出発点として、構造健全性確保を考える上でどのようなことを前提としてよいか、その上で破壊防止をどのように図るか考えることになろう。

高延性材機器の破壊を考える前に、なぜそもそもこれまでの構造規格のほとんどが高延性を要求しているかを確認しておく。第3章にまえがきしたように、経験的に下記のことについて健全性の確保を図るためとしている（特に、「公式による設計」に対して）。

- (a) 構造不連続部における高応力集中部でも健全性を確保できるように。
- (b) 衝撃荷重に対して健全性を確保できるように。
- (c) 応力の突然の、急激な変化に対しても健全性を確保できるように。

しかしながら、これらのためにどのくらいの延性があればよいのか、そもそも延性としてどのような材料特性を考えればよいのかについてまでは規格として陽には言及していない。

さて、本題について検討する。想定している破壊の仕方は、延性破壊であることは論をまたない。では、延性破壊としてどのようなイメージを描いているかというと、一般的には、結晶学的にどうこうということを規定するのではなく、上記(a)～(c)として示したことが保障される延性破壊であることを求めている。このために、次の3つの力学的なパラメータについて要求事項を規定している。

- ・強度 (strength)

- ・延性 (ductility)
- ・切欠き靱性 (notch toughness)

(1) 切欠き靱性

例えば、原子力機器のなかで原子炉圧力容器など安全上特段に重要な機器については、欠陥の検出性を考慮して板厚 t の $1/4$ ($t/4$) の深さまでの欠陥が万が一存在するとしてもこの欠陥が不安定に進展することがないように靱性を有することを求めている。その他の機器においても、シャルピーV ノッチ衝撃値や横膨出量などについて下限値を規定している場合が多い。なお、材料受入検査時の機械試験において試験片を板厚の $1/4$ のところから採取するのは、 $t/4$ の深さの欠陥を考えることと関係している。

もともと、このような靱性要求 (toughness requirements) が課されるようになったのは、第二次世界大戦中に船舶が脆性破壊による破壊事故が多発したことによる。それまでは、使用実績などを判断して材料を規格として認めていたようである。

(2) 強度と延性

一般火力機器などでは、強度と延性を表す力学的パラメータとして降伏比 (yield-to-tensile strength ratio) σ_y/σ_u に注目している。通常の延性が十分に高い金属材料であれば降伏比はだいたい 0.5 くらいである。ただし、降伏強さを熱処理などにより高めれば 1.0 に達する高強度鋼 (例えば、QT 熱処理した T-1 鋼。この場合には降伏比は約 0.93) など使われている。このように降伏比が著しく 1 に近い材料では一様伸びは 10% を大きく下回り、引張破断伸びも 10% をかろうじて超えるくらいに下がっている。しかし、現代では周知されるようになってきたが、延性を表すのに破断伸びは適切ではなく、引張試験の結果を用いるとすれば絞り (面積縮小率) を用いるのが適切である。絞りであれば、このような高強度鋼であっても 50% 以上ある。このような理由から T-1 鋼 QT 材の切欠き靱性は良好であり、シャルピー遷移温度 (衝撃値を 15ft-lb として) は -195F である。

ただし、降伏比が約 0.8 を超えるくらいに降伏強さを高めた材料では、疲労特性に関して繰り返し軟化を著しく生じる。従って、疲労評価上は注意が必要である。

では、これまで構造健全性確保の観点から延性について下限が規定されているかというと、非クリープ温度域ではほとんどない。延性が応力の多軸性などによって著しく変わることから、延性で規定するよりも応力で規定している。唯一、極限解析の規定において、局所ひずみを 5% 以下に制限する規定がある [4-4]。これは、破断延性が十分に 10% より高いことを前提として (直接的には、降伏比が 0.7 以下)、設計裕度 2 を考慮したものである。クリープ破断延性が 10% 以上あることを前提として局所最大クリープひずみ (正確には全ひずみ) を 5% 以下に制限していることと同様である。

また、原子力機器として、使用済み燃料の輸送容器に使う延性鑄鉄 (Ductile cast iron) に対して、引張破断伸びが 12% 以上という制限が 1980 年代に設けられた [4-5]。これは、延性鑄鉄が延性を改善しているとはいえ、依然として引張破断伸びが 10% 程度であるため、当時、規定が必要と考えたようである。ただし、この規定は曲げモーメントに対する限定条件を意図しているが、前述したように、曲げモーメントに対する規定としては合理性がない。すなわち、曲げモーメント負荷の場合には、形状係数効果として知られるように、最大応力は膜応力より

も高応力まで許容できる。これは、前述したように、曲げモーメントが負荷する場合には、そもそも加工硬化（ひずみ硬化）するときには塑性不安定は生じないのであるが、保守的に弾完全塑性体を仮定するときには塑性ヒンジが形成されると塑性不安定となるからであり（いわゆる塑性崩壊）、このときの曲げモーメントが、最大応力が降伏強さに達する（弾完全塑性体では、引張荷重に対してはこのとき塑性不安定になる）曲げモーメント（降伏モーメント）よりも大きいからである。このときの最大ひずみを破断ひずみ以下に制限しようと考え、破断ひずみとして引張破断伸びを採用している。しかし、曲げモーメントの破断ひずみとして引張破断伸びを当てはめるのは正しくない。引張破断伸びは、あくまでも引張荷重のような荷重制御型応力が引張膜応力として作用する場合にのみ意味がある破断伸びである。当時、引張試験に面積縮小率の報告は義務付けられておらず、義務付けられていた破断伸びを採用したことも理由の一つと推測される。

中間延性材機器での破壊

高延性材機器の場合には、破壊は、初期欠陥を起点とする脆性破壊ではなく、延性破壊であり、とりわけ、塑性変形の結果として生成するボイドを起点としてボイド間リガメントのせん断型破壊となることを暗黙の了解としてしていると考えられる。そのための必要条件である高延性・高靱性を機械試験などにより力学的に保証していると考えられる。表面的には、延性破壊であることを結晶レベルで保証することは求めている。しかしながら、延性が低下し、あるいは、第3章で考察した完全脆性材となると、初期欠陥、あるいは、使用中に生成、成長する欠陥が不安定進展し、脆性的な破壊に至る。この場合には、結晶レベルでの検討が必要になってくる。

構造健全性確保の考え方を構築するという観点から高延性材機器から脆性部品までの破壊を体系的に考察しようとする、第2章、第3章及び本章での検討から、破壊の仕方については Fig. 4.1 に示す分類で考えるのが望ましいと考える。この分類に基づいて、中間延性材機器の場合に破壊の仕方がどのようになるのか、それを防止するにはどうすればよいのかを考察するのがよいと考える。

破壊の仕方を Fig. 4.1 のように分類する意図は、工業レベルで生産する材料に完全な無欠陥はあり得ないが、存在する欠陥を“無害なもの”として現実的に扱えるかどうかという観点から考えようということである。これまでの議論から明らかなように、破壊までに相当の塑性変形が生ずるのであれば十分な延性と靱性を有しており、適切な品質管理が行われている材料においては少なくとも初期欠陥は“無害なもの”として扱うことができる。すなわち、き裂進展に対する塑性変形による抑制効果が期待でき、その欠陥が不安定化して急速進展し破壊に至ってしまうことは考えにくい。それに対して、“無害な欠陥”として扱えない場合には、存在する欠陥について安定性評価が必要になる。この場合の構造健全性確保は、第3章に提案した考え方を適用することになり、欠陥コントロールに必要不可欠な欠陥検査などの品質管理を厳しく、高い信頼性をもって実施する必要がある。

存在する欠陥が無害かそうでないかを判断する基準としては、これまでの経験から、延性が数10%あれば延性破壊しており、欠陥を“無害”として扱えようである。Fig. 4.1 では、暫定的に、延性に面積縮小率を用い、少なくとも10%を超えて10%レベルを判断基準としてみた。この値は、今後、詳細に検討する必要があることは言うまでもない。

4.2.2 変形

これまでも述べてきたように延性が高い材料を用いた機器の破損防止に関して、破損モードとして延性破壊を想定するのは当然である。延性が高いということは変形能（*deformability*）が十分に高いということであるから、破壊に至らなくても過大な変形が生じ、それにより機器が果たすべき機能を喪失してしまう可能性がある。例えば、伝熱管が異常に膨らむと、管内流速が遅くなるだけでなく、隣接する伝熱管と接触してしまい所定の管外流速が得られなくなってしまう。このため、構造物全体に及ぶ過大な塑性変形が生ずる可能性がある塑性不安定や塑性崩壊の防止を図る必要がある。しかし、せっかく変形能が高いのにそれを禁止するだけで活かさない手はない。ある程度の塑性変形が生じてもそれが機能喪失に至らないのであれば、その塑性変形は許容するのが合理的であり、現行の構造規格はこの考え方に則っている。この表現は誤解を与えやすいので、詳しく説明する。塑性変形は永久に残る不可逆的な変形である。従って、機能喪失に至らないからといってそのままにして運転を継続しているのではなく、有意な塑性変形（*significant plastic deformation*）を生じさせるような事象が生じた場合には、状況確認のため検査などを行うこととしている。この検査のためには、プラントをある期間停止させることになる。従って、発生頻度が高い事象が生ずる度に検査するのは経済的でない。ということで、その事象発生後にある期間をかけて検査することが妥当な事象とは、発生頻度が低い事象ということになる。発生頻度が高い事象に対しては、検査する必要がないように、弾性設計を要求している。

ここで、弾性設計について解説する。塑性変形が生じない弾性域に限定するということであるが、これは、一次応力に対してである。二次応力が重畳する場合には、弾性域に限定するのは厳しすぎ、シェイクダウンすればよいのであって、若干の塑性変形が生ずることを許容している。また、局所的には、そこそこの塑性変形が生ずることを許容している。局所的なピーク応力（強さ）について、疲労損傷評価を行って制限値内に収まっていればよい。

なお、クリープ変形が生ずる高温設計では、若干考え方が異なる。一次応力によってクリープ変形が生じないということは現実的には不可能であり、ある程度のクリープ変形を許容している。その制限値は、機能喪失しないということの他に、規定を策定する上でひずみに関して前提を設けており、その前提値を考慮して定めている。

高延性材を用いた機器の健全性確保のためのこのような考え方、すなわち、破壊防止以外にも機能喪失に至るような過大な変形の発生を防止すること、その一方で、限定された塑性変形が生ずることを発生頻度が低い事象に対して許容するということは、高延性材でなくともある程度の延性があれば当てはめることができる合理的な考え方といえよう。では、どのような条件まで当てはめることができるのであろうか。あるいは、中間的な延性を有する材料を用いた機器の場合には、どのように変える必要があるのであろうか。このことについて考察する。

最初に、基本的なことがらとして、破壊に至るまでに生じる塑性変形量はその途中のプロセスの挙動、すなわち、塑性域の挙動とどのような関係にあるのか考察する。その上で、中間的な延性材では、塑性域の挙動としてどのような特徴があるのか、高延性材の場合と比べてどのように変わるのか検討し、破損防止の観点からどのようなことを考慮しなければならないのか明らかにする。

塑性域の挙動と延性

塑性域の挙動と延性との関係は、これまで議論してきたように、どのような応力分布を生じせしめるかという荷重の特性によって大きく変わる。そこで、圧力など膜的な応力分布を代表する引張荷重の場合をまず考察し、次に不均一応力分布を代表して曲げモーメントの場合について考察する。

膜応力を生ずる荷重：引張荷重

一般に、塑性域の応力－ひずみ関係は、真応力 σ と真塑性ひずみ（すなわち、対数塑性ひずみ） ϵ_p との関係として次式で表す Swift 式[4-6]により精度よく表わされるといわれている。

$$\sigma = A(\epsilon_0 + \epsilon_p)^n \quad (4.3)$$

ここで、 ϵ_0 はひずみ硬化などによる予ひずみ効果を表す。

Fig. 4.2(a) にその概念を示す。まず、上式から、一般的な関係式を導出する。丸棒を引っ張る場合など試験片に生ずる応力が一軸一様として考察できるような場合には、降伏強さ σ_y 、引張強さ σ_u 及び一様伸び ϵ_u は、その定義から、上式を用いると次のように表わされる。

$$\sigma_y = A\epsilon_0^n \quad (4.4)$$

$$\sigma_u = An^n \quad (4.5)$$

$$\epsilon_u = n - \epsilon_0 \quad (4.6)$$

従って、降伏比（yield ratio, or yield-to-tensile strength ratio） r は次のようになる。

$$r = \frac{\sigma_y}{\sigma_u} = \left(\frac{\epsilon_0}{n}\right)^n \quad (4.7)$$

引張強さと一様伸びは、最大荷重点での応力と試験片有効部の伸びに対するひずみを表す。最大荷重点では応力の増分を表す硬化と、断面積縮小による軟化とがバランスしており、従って、真応力－対数塑性ひずみ曲線上では次の条件となっている。

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon_p} = \sigma \quad (4.8)$$

このとき、拡散くびれ（diffuse necking）が始まる。引張荷重下でさらに変形が進行する。

一様応力分布を仮定して真応力－対数塑性ひずみ曲線上で次の条件となるところで局所くびれ（localized necking）が生じる。

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon_p} = \frac{1}{2}\sigma \quad (4.9)$$

くびれによる応力集中で始まったボイドの生成、成長、合体がこのあたりから急激に進行し、ほどなく延性破壊を生ずると示唆されている[4-7]。仮に、計算を簡単にするためにくびれ部でもその平均応力で一様応力分布とすると、真応力－対数塑性ひずみ曲線上で次の条件のとき延性破壊が発生するとしよう。

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon_p} = \frac{1}{m}\sigma \quad (4.10)$$

延性破壊するときの絞り部の最小断面積における平均応力（真応力）、すなわち破壊強さ σ_f とその部分での平均ひずみ、すなわち（破断）延性 ϵ_f は、上記 Swift 式から次式で表わされる。

$$\sigma_f = A(mn)^n = m^n \sigma_u \quad (4.11)$$

$$\epsilon_f = mn - \epsilon_0 \quad (4.12)$$

あるいは、

$$\epsilon_f + \epsilon_0 = mn \quad (4.13)$$

これらの式が意味するところは、予ひずみが大きくなればなるほど降伏比が1に近づき、かつ、破断延性も低下するということである。

引張強さと破断強さとの比 (tensile-to-fracture strength ratio) f は次のようになる。

$$f = \frac{\sigma_u}{\sigma_f} = m^n \quad (4.14)$$

延性と一様伸びとの関係は次式で表わされる。

$$\varepsilon_f - \varepsilon_u = (m - 1)n \quad (4.15)$$

以上は、真応力-真ひずみ関係における議論であった。公称応力-公称ひずみ関係では次のような関係になる。公称応力-公称ひずみ曲線上での破壊強さを σ_{Nf} 、引張強さを σ_{Nu} 、降伏強さを σ_{Ny} と表わすと、

$$\frac{\sigma_{Nf}}{\sigma_{Nu}} = m^n \exp[-n(m - 1)] \leq 1 \quad (4.16)$$

$$\frac{\sigma_{Nf}}{\sigma_{Ny}} = \left(\frac{nm}{\varepsilon_0} \right)^n \exp[-(nm - \varepsilon_0)] \leq 1 \quad (4.17)$$

ここで、 σ_{Ny} は予ひずみがない場合の降伏開始点応力ではなく、予ひずみがあるときの降伏強さを表すことは、真応力-真ひずみの場合と同じである。

上記のことは一般的に成り立つ事柄である。では本題に入って、引張荷重のような膜応力を生ずる荷重を受ける機器において、中間的な延性を示すような材料の場合には塑性域の変形や延性はどのようになるであろうか。上記で導出した関係式を基に考えてみる。 ε_0 が大きくなると破断延性が低下することは明らかである。冷間加工などにより材料に予ひずみ ε_0 が付与され、その予ひずみが $\varepsilon_0 \geq n$ となったら変形挙動はどうなるであろうか。引張荷重の場合には、降伏開始と同時に、塑性変形による降伏強さの上昇としてのひずみ硬化よりも試験片の断面積縮小による軟化が上回るのであるから、Fig.4.2(b)の右上欄に示すように、総体的な塑性不安定領域に入ってしまう。この結果、どうなるかという、最大荷重は、降伏点での荷重が最大荷重となってしまう。すなわち、降伏点での荷重を負荷し続けると、延性破壊に至ってしまう。従来、バースト圧力は、加工硬化材の場合には最大荷重点を表す引張強さだけでなく、公称応力-公称応力関係の加工硬化度合の両者が影響することから、両者から求めていた。しかしながら、このように見かけの加工硬化がなくなってしまうと、従来のバースト圧力公式は適用できなくなってしまう。最初から塑性不安定に入ってしまう場合の破壊荷重を新たに求める必要がある。

これが、中間的な延性材の場合の問題点として重要なところと考える。

延性が低下するとどうなるかの実験的な検討が行われており、上記の式から予想される結果が実際にも表れている[4-8]。例えば、研究的に熱処理を種々変えることで異なる金属組織を作り出し、その塑性変形について検討している。それによると、

- (1) 引張強さが高くなると降伏強さも上昇し、かつ、降伏強さの上昇率のほうが大きいので、ひずみ硬化係数も小さくなる。これは、上式でも物語っている。すなわち、予ひずみが増えること、すなわち、硬化することで降伏強さが高くなり、従って、引張強さに至るまでのひずみが小さくなる。このため、引張強さに達した時の断面積は、予ひずみの増加に従って増える。引張強さは、真応力-真ひずみ曲線上ではある固定値であるとすれば、応力と断面積の積が荷重であるから、引張強さにおける荷重、すなわち、最大荷重

は増大する。この結果、公称応力-公称ひずみ曲線上での引張強さが上昇する。ただし、降伏強さほどではない。

(2) 降伏比 (yield ratio, yield-to-tensile strength ratio) が高くなると、一様伸びは減少する。現実にはこのような状況が現れないのかという点、実際に引張破断伸びが大きく低下する場合があります、典型的な例として次のことがある。

a) QT 熱処理により高強度化を図り、降伏強さを上昇させた場合[4-9]。

降伏比も上昇する。ただし、必ずしも高延性でなくなるわけではない。絞り（面積縮小率）は十分に高い場合が多い。

b) 中性子照射による硬化や熱時効による硬化

この場合も降伏強さが著しく上昇し、相応して降伏比も上昇する。照射硬化の場合[4-10]、比較的低温での高照射条件では、降伏強さの上昇に伴って真応力-対数ひずみ曲線上において降伏開始点における加工硬化係数が減少する。減少して降伏強さの上昇としての硬化よりも面積縮小による幾何学的な軟化が上回ると、公称応力-公称ひずみ曲線上において降伏が始まると同時に塑性不安定化してしまい、従って、加工硬化が見られず降伏比が 1 に達してしまうことがある。上述の議論からも明らかなように、この場合には一様伸び ϵ_u は 0 になってしまう。

これらの場合には、これまで述べてきたような高延性材の前提が必ずしも成立するわけではない。引張荷重を受ける場合に中間的な延性を示す材料を用いる機器の構造健全性確保の考え方の問題点は、降伏すると同時に塑性不安定化してしまうような場合にどうするかに尽きる。

不均一応力分布を生ずる荷重：曲げモーメント

膜応力的ではなく、不均一応力分布ゆえに一部が不安定化条件になっても周辺が助ける面積効果（あるいは、形状係数（shape factor）効果とも呼ばれる）を期待できる荷重条件の場合を考える。その代表として曲げモーメントを検討する。

まず、破壊に至るまでにどのような塑性挙動をするかを考察する。曲げモーメントを受ける梁の場合に、その材料の真応力-真ひずみ（対数ひずみ）関係において必ず加工硬化するのであれば、たとえ塑性域に入ったとしても次の理由から、塑性不安定化条件に達したとしても無制限に変形が進行してしまうという意味での塑性不安定を生じないことは明らかである。

(1) 断面の平面保持

(2) 中心部には必ず弾性核（elastic core）が存在すること

ただし、圧縮側が局部座屈する可能性はあるが。この結果、弾完全塑性体の場合に考えられている全面降伏しての塑性崩壊（塑性ヒンジの形成）、そして、最終的に無制限に変形が進行してしまう塑性不安定化ということは、加工硬化する限りはありえないことである。中心部に弾性核を残しているものの、外壁から主要部分は塑性域に達しているという定義での塑性崩壊は生ずる。さらに曲げモーメントを負荷して変形が進行すると、表面にき裂が入り、しまいには延性破壊すると考えられる[4-11]。最終的な局面まで曲げるとどうなるかについて解析的な検討が行われ、面積的な減少による軟化が降伏強さの上昇による硬化を上回ることによる無制限な変形の進行は起こらず、起こるとすると圧縮側における分岐 (bifurcation) であることが示されている[4-12]。最終的な局面とは、板の場合には、360° 曲がってしまうことをいう。この少し手前で、ある条

件を満たすアスペクト条件（板厚と幅との比）において、まず、圧縮側表面に分岐が生じる。その後さらに曲げると引張側表面に分岐が生じ、最終的な局面に至る。圧縮側に分岐が生じるのは、板が 300° くらいまで曲げられた場合である。なお、本文献[4-12]は解析であり、き裂発生については言及していない。

上記のことは、曲げモーメントのような面積効果が期待できる荷重条件の場合について、引張荷重の場合を準用するのではなく、適正な限界強さ（limiting strength）を明らかにし、これに対して設計裕度を考慮すべきであることを主張している。それが、一貫した健全性確保の考え方として重要である。

このように引張荷重とは異なる変形挙動、破壊に至るプロセスに対して破壊防止をどのように考えるべきであろうか。本件は、次節で考察することであるが、ここで検討しておく。

【曲げモーメントに対する破壊防止について】

繰返しになるが、これまで述べてきたことを、まず、まとめておく。塑性変形が大きく進行すると、介在物を中心に破壊または剥離が起こる。この発生条件は、応力がある限界値に達した時か、ひずみが限界値に達した時か、ということについて、著者は十分には把握できていない。介在物などの破壊または剥離によりボイドが発生すると応力集中がその近傍で起こり、介在物の破壊などをさらに加速させる。最終的に、き裂が全面に広がるか、ボイド間リガメントのせん断変形による破断などによりいわゆる延性破壊する。引張荷重が負荷する場合のように、外力（正確には force-induced loading）によって生ずる応力分布が膜応力型（すなわち、断面に渡って一様に分布する）の場合には、塑性不安定条件に至ると、断面全面に渡ってこの条件を満たしている。この結果、断面積の減少がもたらす軟化（従って、幾何学的軟化と称している）が、降伏強さの上昇として表わされる硬化を断面全面で（すなわち、総体的に）上回るため、塑性不安定現象が実際に生ずる。ただし、だからと言って、くびれが生ずるとは、これだけからは言えない。ある、強度的に弱いところでこの不安定現象が生ずるため、くびれとして現れる。くびれには、拡散くびれと局部くびれがあることは前述したとおりである。

これに対して、不均一分布を生ずる曲げモーメントなどの場合には、変形に関する拘束条件などの下で、一部分（一般的には最大応力の個所）が塑性不安定化条件に達しても同一断面内の他の部分がまだ達しておらず、かつ、不安定化しようとするのをこの他の部分が抑制する。そして、重要なことは、真応力-真ひずみ曲線上で加工硬化しているのであれば、この抑制効果は曲げ変形が進んでも効いている。それ故、構造物として不安定化することはない。

このように、荷重の特徴やくびれ発生の有無などにより、延性破壊が生ずる条件は力学的に変わる。ミクロレベルでの金属組織的には、局所的にある応力あるいはひずみに達した時にボイドの生成が始まり、これが成長し、合体する、これがトリガーとなって破断するというメカニズムは変わらないであろうが、延性破壊条件が力学的には変わる、ということは、延性破壊防止策を、あるひとつの限界強度を用いて画一的に構築するのは望ましくない。

繰返しになるが、引張荷重に対して、限界強さを引張強さとすることは意味のないことではない。破壊に至るプロセスとして、塑性不安定 → 延性破壊であること、そして、塑性不安定化するときの荷重で延性破壊を引き起こしうること、その一方で、破壊強さの測定が容易でないこともあり、引張強さを限界強さにすることは合理性がある。考えなければいけないことは、中間的な延性材の場合に、限界強さをどう考えるか、である。

これに対して、曲げモーメントの場合には、塑性崩壊を破損モードとして考えるにしても、塑性崩壊に至ったからといって即、延性破壊に至るわけではない。従って、延性破壊の直接的な判断基準として塑性崩壊を用いることはあまり意味がない。そもそもなぜ塑性崩壊を破損モードとして考えたのであろうか。これは、従来の規格においては、規格作成の根本思想ゆえと考える。文献[4-13]から次のように考えられる。そもそも一次応力制限を考えると、膜応力に対する制限と曲げ応力に対する制限が同じでよいかということが検討されたであろうことは至極自然と考えられる。では、曲げ応力に対する制限をどう考えるか、というときに、当時の計算技術を考えると、極限設計理論 (limit design theory) で考えることも自然であろう。極限設計理論とは、弾完全塑性体 (perfect plasticity with no strain-hardening) を仮定して設計理論を構築する考え方である。そして、許容応力は完全塑性体として求め、極限設計理論が与える制限式を満足するのであれば、十分に延性のあるいかなる材料から製作された容器も安全であることを保証すると考えてよい、とするものである。そうすると、引張荷重を受けるまっすぐな棒の場合には降伏強さの応力を生ずる荷重で塑性崩壊する。それに対して、曲げモーメントを受ける梁の場合には、降伏強さを超えて、塑性ヒンジが形成されるまでモーメントを増やすことができる。その増加割合を「形状係数」と称する。実際の材料は加工硬化するわけであるが、それは裕度と考える、とする。

まとめると、保守的な方法として弾完全塑性体を仮定する極限設計理論の基づくこととして、その場合には塑性崩壊が明確に現れることから、塑性崩壊を生ずる応力を限界強度に考えて制限している。

材料が中間的な延性材の場合に、極限設計理論に基づいてこのように考えることの問題点としては、次のようなことが考えられる。

- 1) そもそも真応力-真ひずみ曲線上でひずみ硬化 (加工硬化) する場合には、全断面に渡って降伏するという意味での塑性崩壊は生じない。また、延性破壊についてみれば、弾完全塑性体を仮定しての塑性崩壊が実際に延性破壊する場合のモーメントに対してどの程度の裕度を持つものか、著者の勉強不足で、把握できていない。高延性材の平均的な引張特性として、引張強さは降伏強さの約 1.5 倍、破壊強さは引張強さの約 2 倍であることから、単純に考えて、表皮応力が破壊強さに達した時に延性破壊が始まると仮定し、モーメントと表皮応力が比例すると考えると、延性破壊モーメントは降伏開始モーメントの約 3 倍である。弾完全塑性体を仮定したときの塑性崩壊モーメントは降伏開始モーメントの 1.5 倍くらいであるから、弾完全塑性体を仮定した塑性崩壊モーメントに対して延性破壊は 2 くらいの裕度があると推測される。これがオーステナイト系ステンレス鋼の場合には、降伏強さに対して引張強さ、破壊強さがそれぞれ、2 倍以上、約 7 倍以上あるので、裕度は 5 以上あると考えられる。
- 2) すでに導出したように、破断延性が次式で表わされるとすると、

$$\epsilon_f = n m - \epsilon_0 \quad (4.18)$$

延性低下は、 n が低下する、あるいは、硬化して ϵ_0 が増す場合に生ずる。これは、真応力-真ひずみ曲線が弾完全塑性体の曲線に近づくことを物語っている。上記 1) の議論から、裕度が 1 を下回る場合とは、1) の議論の仮定が成立するとすれば、破壊強さ σ_f が降伏強さ σ_y の 1.5 倍を下回ったときである。この比は次式で表わされることから、

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_y} = \left(\frac{mn}{\varepsilon_0} \right)^n \quad (4.19)$$

予ひずみが下式を満足する場合である。

$$\varepsilon_0 \geq \frac{mn}{1.5^{1/n}} \quad (4.20)$$

以上のことを概念的に Fig.4.3 に示す。従って、炭素鋼などでは予ひずみが約 10%以上、オーステナイト系ステンレス鋼では約 60%を超えると、弾完全塑性体を仮定しての塑性崩壊モーメントよりも表皮での延性破壊開始の方が早い可能性がある。実験的に検証する必要がある。なお、この条件を満たす場合であっても、破断時の延性は 50%くらいある。

- 3) 2)での議論から、たとえば、高延性材の場合には塑性崩壊モーメントという城壁のはるか内側に延性破壊モーメントという天守閣があるので、塑性崩壊モーメントで防ぐことだけを考えていればよかった。しかし、中間的な延性材になると、塑性崩壊モーメントの城壁の一部に天守閣がある、あるいは、天守閣が城壁の外にあることになってしまい、天守閣そのものを守ることを考えなければいけなくなってしまう。

以上の問題点から、極限設計理論ではなく、加工硬化する場合の限界強さを明確にし、それに基づいて破損防止を考えるべきである。極論的な言い方をすれば、塑性崩壊は弾完全塑性体を仮定するからこそ想定する破損モードであり、実際に加工硬化する場合には想定する必要はない。ただし、総体的に過大な変形の防止は別途、合理性をもって考えるべきではある。それよりも、延性破壊を開始するモーメントを適正に考え、これに対して設計裕度を考慮して制限すべきである。ただ、モーメントが負荷する場合に、延性破壊を開始する条件は、表皮応力が破壊強さに達した時なのか、表皮ひずみがある限界延性に達した時なのかは、よくわからない。そこで、とりあえず、荷重レベルで制限することを提案する。

すなわち、曲げモーメントによる延性破壊の防止は、引張荷重が重畳する場合を考え、次式により図る。

$$\frac{F}{A_F} + \frac{M}{A_M} \leq 1 \quad (4.21)$$

ここで、 A_F は引張荷重に対する抵抗（限界強さとして引張強さ）から求まる許容荷重、 A_M は曲げモーメントに対する抵抗（限界強さとして破壊強さ、例えば）から求まる許容荷重である。なお、引張荷重と曲げモーメントの効果を荷重分数和で表わしているのは、高延性材での考えを参考にしてのことである。これに加えて、引張荷重を下記のように制限することもありうるが、上式に含まれていることである。

$$\frac{F}{A_F} \leq 1, \text{ すなわち、} F \leq A_F \quad (4.22)$$

あるいは、次のように制限する。

$$F \leq A_F \text{ and } F+M \leq A_M \quad (4.23)$$

高延性材機器に対しては、弾完全塑性体を仮定した塑性崩壊モーメントよりも破壊モーメントの方が高いので、形状効果を考慮した割増を許す従来規定、すなわち、

$$P_m \leq S_m, P_m + P_b \leq K S_m \quad (4.24)$$

が適用できる。高延性に限定した場合には、この制限式を用いることは合理性がある。より体系

的には、ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII, Division 3 の規定が参考となる。

なお、ここで、荷重レベルで抵抗を求めるときの留意点を述べておく。現行の方法は極限解析 (limit analysis) などとして知られているように、荷重パラメータと変位パラメータとの関係を求め、2倍勾配法で抵抗を求めている。これは適正なのであろうか。この2倍勾配法は、降伏を開始する荷重点（あるいは、許容応力を降伏強さにして）を中心にした議論である。しかし、今求めようとしているのは、延性破壊荷重である。荷重の種類によって延性破壊条件が異なることが想定されるときには、その延性破壊条件の違いを適切に考慮できるものでなければならない。その意味で、2倍勾配法が適切とは思われない。

4.3 構造健全性確保の基本思想

第2章にまとめた高延性材機器に適用している現行の構造規格の考え方、そして、第3章で提案した脆性材部品に対する構造健全性確保の基本的考え方、並びに、第4章で検討してきた中間的な延性材の機械的性質として推測される特徴と破壊などに対する考え方を基に、著者が高温ガス炉機器の構造規格、及び、核融合実験施設においてダイヤモンドなどの脆性材を用いたり10dpaに達する中性子高照射損傷を受けて材料特性が大きく変化する部材が存在する場合に適用する構造規格を考案してきた経験から、中間的な延性材を用いた機器、あるいは、経年変化により使用材料の延性が中間的な延性レベルに変化する場合に構造健全性確保の基本思想はどうあるべきかについて、体系化の視点をもって次のように提案する。

(1) 根本思想

- 1) 設計を含めた建設段階、並びに、使用段階（運転段階あるいは供用段階）を通して、安全性や経済性の確保など要求される機能を達成し、維持するために必要な品質水準を確保する。すなわち、構造健全性を確保する。構造健全性とは、機器が構造的な観点からある裕度をもって要求される機能を達成し、維持することと考える。
- 2) 必要な品質水準を確保するために建設段階及び使用段階の各工程、すなわち、設計、材料選定、材料製造 (production) と整形 (forming)、材料受入検査、輸送、製作 (fabrication)、検査・試験、運転、保守・補修（あるいは維持）、交換、解体において、適用する技術は何をどの程度の信頼性をもって行うかということについて（例えば、両面突き合わせ溶接を所定の技能を有する溶接士により施工する）、技術の組み合わせは唯一ではない。

材料特性が異なる材料、あるいは、使用中に経年変化として材料特性が大きく変化する場合には、主には設計工程においてどのような考え方で構造健全性を確保しているかに大きく左右される。延性や靱性が低い、あるいは、経年変化により低下して、潜在的な欠陥が存在することを前提とした設計評価が必要であれば、たとえ初期状態において高延性、高靱性であっても、材料受入検査、製作時の検査・試験、並びに、使用段階における定期的な検査・試験あるいはモニタリングは、必要な信頼性を有する欠陥検出技術や欠陥サイジング技術を適用し、信頼性のある検査員によって実施することが不可欠である。さらに、材料製造工程や製作工程などにおいて欠陥が不安定成長して急速破壊を引き起こすような有害なサイズにならないように、十分に信頼性の高い技術を用い、信頼性の高い熟練工により施工することが求められる。運転管理についても同様である。

(2) 設計工程における思想

1) 破損防止は制御できる範囲で図ること

合理性をもって破損防止を図る上で重要な思想は、高延性材機器であろうが脆性材部品であろうが、破損に至る種々のプロセスにおいて制御できるプロセスでの防止を図ることと著者は考える。ここで、脆性材部品を、部品とあえて機器としていないのは、脆性ゆえに、機器というレベルでの大型構造物は強度部材として難しいと考えるからである。制御できない状態で破損防止を考えることは、労多くして益少なしとなろう。破損防止を図

る上で、ある状態で考えると制御できず、例えば、無制限に変形が進行してしまうのであれば、その手前の制御できる状態に限定するようにすることが、破損防止の基本と考える。この観点から限界強度（limiting strength）を考えるべきである。

また、この制御できるプロセスでの防止を考える方法として、把握できる欠陥についてその進展を評価し、制御できる範囲内において、許容される最大欠陥に達することを防止するのが合理的であるならば、いわゆる破壊力学による設計評価も望ましいと考える。

2) 延性に関係なく共通して考慮すべき破損モード

プラントの運転を、安全性と経済性との両立を図りながら遂行するためには、構造健全性の確保、すなわち、十分な経済性を有する適切な裕度をもって安全性の確保を図ることが重要である。この構造健全性を損なう要因として、延性の如何によらず共通的に次のことを考える必要がある。

(a) 破壊（延性破壊か脆性破壊かの区分は別として）

(b) 繰返し負荷により欠陥が進展、拡大して機能喪失を引き起こすこと（例えば、構造部材を貫通すること）

(c) 座屈

上記のことは、脆性材部品の場合に破損要因として何を考えなければいけないかを考えれば明らかである。

破壊については、Fig.4.1 に示した分類に従って適切に対処すべきであろう。それは、潜在的に存在する欠陥が進展するとき、それが不安定化して急速に進展する、いわゆる不安定破壊を引き起こす可能性が高いか、ほとんど無いのかによって健全性確保の視点が異なるからである。十分な延性があるときには、すなわち、十分な変形能があるときには塑性変形がき裂の進展に対する抑制効果をもつ。それゆえ、信頼性のある技術に基づいて製造、製作された構造物に潜在的に存在する欠陥では、不安定破壊に至る可能性はほとんどない。この場合には、構造規格が前提としている信頼性レベルの技術により製造、製作されたことを確認することが最も重要であり、設計は、これを受けて無欠陥を前提とすることができる。同図中の真ん中に示している振り分け判断基準としての延性値、10%レベルというのは、その閾値として著者の経験に基づき推測する値である。

疲労による欠陥の進展、貫通は、破壊に至らない場合であっても気密性を損なうことから、破損要因として想定する。この場合に重要な視点は、後述するように、疲労の観点から LBB（Leak before break or burst）が成立するかどうかである。疲労については、下記 4)項で体系化の観点から議論する。LBB が成立しない場合には、欠陥の進展に対して慎重に対処する必要があり、ASME B&PV Code Section VIII, Division 3 のように、破壊力学を用いて欠陥の進展を具体的に評価する必要がある。ただし、前述したように、破壊力学の課題があるが。

3) 変形能がある場合には、塑性変形を許容

使用環境下でも材料の変形能がある程度以上あることが保証されているのであれば、ある程度の塑性変形が生じることを許容することは合理性がある。どの程度の塑性変形を許容するかは、下記のことを考慮して決めるべきである。

- (a) 要求される機能や性能が確保できる変形量やひずみ量は、極端に言えば、個々のプラントに特有な値である。オーナーの考えによっても変わりうる。このため、構造規格において一般化した値として具体的に規定することは難しい。
- (b) 構造規格において変形量やひずみ量の制限を規定する必要があるとすれば、一つには、規格作成上の前提条件がある。例えば、微小変形を前提としているのであれば、ひずみ量を約 5%以下に制限する必要がある。もう一つの重要な視点は、Coffin や朝田らが提案したラチェットと疲労との相互作用である。これについては、後述する。現状の規格においては、繰返し生ずる事象に対する疲労解析において、一次応力に対しては総体的な塑性ひずみが生じないこと、二次応力については一次応力と相まってシェイクダウンし、有意な塑性変形が生じないことを前提としており、従って、それぞれの応力制限でそれを求めている。
- (c) 既に第3章の冒頭で触れたように、従来の構造規格が高延性に限定している理由は、下記のことを考慮してのことである。

- i) 構造不連続部における高応力集中。これによる塑性拘束の結果、延性、靱性が低下する。

- ii) 衝撃荷重

- iii) 応力の突然の、急激な変化

ただし、どのくらいの延性が必要かという下限値は、従来の構造規格では陽には規定されていない。種々の文献から、下限値は、面積縮小率で約 10%とするのが現実的と思われる。

4) 塑性変形を許容する場合に考慮すべきこと。

塑性変形を許容するとして、その場合の構造健全性確保の考え方を構築する上で次の視点は重要である。

- (a) 塑性変形を生ずるメカニズムが制御可能であるか否か。制御不可能なメカニズムの一つとして塑性不安定がある。

変形制御が不能に陥るようなメカニズムが生ずる場合には、そのメカニズムが発生しない限界に対して十分な裕度をもって制限すべきである。引張荷重負荷の場合の塑性不安定で言えば、塑性不安定化する前の限界強度 (limiting strength) である引張強さ σ_u に対して制限する。

ここで、塑性不安定とは、前述した一般的な定義ではなく、構造物において総体的に（構造物全体にわたって）硬化よりも軟化が上回る結果、構造物の変形が無制限に進展してしまうことを言う。局所的に軟化が硬化を上回る条件となっても、それが総体的でなければ構造物の変形として不安定化するわけではない。従って、塑性不安定は引張荷重や圧縮荷重の場合に生ずる。曲げモーメントの場合には、無制限に変形することを抑制するメカニズム（断面の平面保持、弾性核の存在）が働いている。このメカニズムが働かなくなるのは、塑性ヒンジが形成される弾完全塑性体の場合である。すなわち、真応力-真ひずみ（あるいは、対数ひずみ）関係において加工硬化（ひずみ硬化）するのであれば、曲げ変形は制御可能であり、従って、塑性不安定に係る限界強

度で制限する必要はない。

(b) 通常運転時や発生頻度が高い事象が生ずるときにも塑性変形を許容するか。

これは、疲労設計の考え方と深くリンクする。また、クリープ設計との一貫性を考えると、塑性変形により構造部材内に有害な欠陥が生じない範囲で塑性変形を許容するのが合理的と考える。

ただし、現状では、どのくらいの塑性ひずみを許容できるか、さらには、塑性ひずみが総体的に生じたのちの健全性評価法が未検討であり、今後の進展に期待するしかない。

(c) ラチェット疲労相互作用の考慮

ラチェットによる膜ひずみがあると疲労強度は低下する。非クリープ温度域での従来規格では、ラチェット現象が生じないように一次＋二次応力を制限していた。すなわち、シェイクダウンするように。そして、疲労損傷評価にあたって累積ひずみ量を気にする必要はなかった。しかしながら、規格の合理化、高度化として、有害でなければラチェットひずみの累積は許容すべきである。これは、既にクリープ設計においてはクリーブラチェットによる非弾性ひずみの累積を認めているのであるから。ただ、ラチェットひずみの累積を認めるとすると、ラチェット疲労相互作用を考慮する必要があることは当然である。

5) 疲労破損の防止（耐疲労設計）

疲労破損は、実際に破損した機器の大半を占める破損モードであることから、特段に考慮する必要がある。従来、高延性材機器については、第2章に述べたように、**No fatigue cracking** が耐疲労設計の基本となっている。設計疲労線図を作成するベースとなっている実験室規模での平滑疲労試験片を用いた疲労試験結果によると、疲労き裂の発生、成長は疲労寿命の相当に後半部分でやっと生じる。それに対し、現実の構造物では種々の原因から微小な欠陥が存在し、疲労の観点から特に重要な表面欠陥も存在する。このように欠陥が存在する場合であっても、高延性材では、十分な延性と靱性があるので、適切な品質水準が維持されるように製作されており、かつ、設計疲労線図を用いて設計されているのであれば、許容サイクル数内においてはき裂の発生 (**crack initiation**) がなかったことが報告されている[4-14]。平滑試験片から得られた試験データにより作成されている設計疲労線図が実機構造物に対しても保守性がある理由は、文献[4-15]に記述されている。このように、設計疲労線図を用いた耐疲労設計は、理想的な状態での試験片データをベースとし、表面効果やサイズ効果などは設計裕度を含めて考えてきた。この設計法の妥当性は、経験的に実証されてきた。

しかしながら、延性が低下し、靱性も低下していくと、上記の設計法が適切とは言いきれない。延性や靱性が低下していくと有意な欠陥が存在する場合に、繰返し負荷によりどのような疲労破損が起こりうるかを Fig.4.4 に示す。(1) に述べた著者が提案する破損防止の基本に立ち返ると、疲労による破損を制御できるのであれば、すなわち、安全確保などの機能を喪失する前にプラントを安全に停止することができるのであれば、破損寿命を限界強度に考えればよい。例えば、タイプ-A, B の場合のように。しかし、タイプ

—D, E のように機能喪失（貫通き裂の発生）を引き起こす破損段階では不安定成長し制御できないのであれば、貫通き裂に至る前の欠陥の進展段階を把握し、制限する必要がある。具体的には、まず、耐疲労設計の基本は、初期欠陥など使用中に存在する欠陥を原因として繰返し負荷により欠陥が進展するとき、機能喪失に至ることを制御可能な状態において防止することである。しかし、タイプ—D, E のような場合には、運転中の監視計装などが何らかの異常を検出してプラントを停止することができるまで欠陥が成長する前に、不安定成長してしまう。あるいは、検出して運転停止しようとしているときに不安定成長し、破壊してしまう。その前の段階に制御可能な状態で留める必要がある。そして、理想的な状態での疲労試験片のデータから作成される設計疲労線図に基づく設計方法を見直す必要がある。

代替手法として、次のことが考えられる。

- (a) 欠陥付きの試験片を用いてそのデータから設計疲労線図を求める。設計最小強度をどういう破損状態として定義するかが重要である。
- (b) 破壊力学的手法を用いて欠陥成長を適切に評価し、不安定成長を引き起こさない欠陥サイズ、応力条件や破壊靱性値などに制限する。

(a)の方法はある程度延性や靱性が高い場合に成り立つ考え方であり、高延性材から脆性材までを対象に健全性評価を考えるのであれば、2)の方が望ましい。しかし、(b)の破壊力学的な手法の場合には、第3章で言及したように、材料受入検査時及び完成検査時などにおいて欠陥を非破壊で検査しサイズなどを同定する必要があるだけでなく、欠陥が運転中に発生あるいは成長するのであれば運転段階でも定期的に検査やモニタリングをする必要がある。

(3) 経年変化により材料特性が大きく変化する場合に考慮すべきこと

基本思想として次の2つの観点について著者の考えを述べる。

- ・品質保証
- ・設定値の保証

1) 経年変化と品質保証

高延性材であれば延性破壊は初期欠陥にほとんど影響されない、すなわち、鈍感であるが、延性が低下して（**reduced ductility**）初期欠陥でも潜在的に有害な欠陥と考える必要が生ずるようになると、破壊防止の観点からは、経年変化により材料の品質が劣化したと考えるべきであろう。品質水準を要求レベルに保つためには、検査・試験や製造・製作技術などをより信頼性の高いものにする必要がある、ということになる。

2) 経年変化により大きく変化する材料特性の保証（材料の品質保証）

ところで、経年変化により材料特性が大きく変化する場合に、変化した強度や延性などでサイジングする、あるいは何らかの判断基準と比較するとき、その変化特性をどのように保証すればよいのであろうか。すなわち、前提としている変化特性を上回る変化が生じないようにすることをどうやって保証するか、ということである。

材料特性の変化を引き起こす原因は、材料自身にある場合と、環境条件を含めた使用条件にある場合の両方が考えられる。材料自身の場合には、経年変化を引き起こす要因、例えば、化学組成や熱処理条件、をコントロールする必要がある。

使用条件の場合には、定常状態での経過時間のみがその要因であれば話は単純だが、過渡時の変化率（温度変化率など）、あるいは影響は少ないと考えられているが照射速度などが影響することがある。この場合には、どこまで考えるかは、オーナーが決めることと考えられる。規格においては、最小要求（minimum requirements）として、種々の効果による変化を現実に行きうる条件の中で包絡する保守的な値として定めるということも一案である。しかし、この場合には、保守的過ぎる可能性がある。例えば、照射硬化した材料に繰返しを付加すると繰返し軟化し、初期状態に戻る可能性がある。このような場合に、包絡する値として定めるとすると、「強度は未照射材での値、延性は照射材の値とする」ということは保守的過ぎる。

（４）評価事象の選定に際し、プラントの特徴を合理的に考慮する必要性

中間的な延性とは直接は関係しないが、一般論として非常に重要なこととして、設計にあたり、どのような事象を構造健全性確保上考慮すればよいかは、プラントの安全上の特徴などを考慮して合理的に決めるべきである。すなわち、軽水炉のクラス 1 機器に対する構造設計で行われている 4 段階の運転状態（あるいは、供用状態）を必ず考慮しなければならないという必然性はなにもない。具体例で以下に議論する。

- 1) トカマク型の核融合システムでは、高性能なプラズマ条件で運転するため、本来は不安定なプラズマ状態にあるが制御により運転を可能にしている。このような場合には、制御されたプラズマ運転状態からの逸脱が起これば、プラズマはディスラプションしてしまう。ディスラプションしてしまうと、プラズマ内での核融合反応は消滅し、エネルギーの発生はなくなる。さらに、プラズマが不安定となってディスラプションしたり、VDE と呼ばれるプラズマが移動しながら消滅する際にプラズマに対向する機器などに負荷する電磁力が、荷重としては支配的である。これと比べると事故時に生ずる荷重は大きくない。この結果、異常が発生しても、事故に進展させる主要な駆動力が喪失するので、事故に進展することがない。あるいは、冷却系配管破断などが万が一生じても、プラズマに対向する機器などでは、上述した電磁力を上回ることがなく終息してしまう。このような荷重の特性であれば、構造健全性確保のために事故事象を評価する必要はない。原子炉の安全思想においてよく触れられる深層防護（defense-in-depth）としての安全対策は、事故に進展する、あるいは、事故がさらに拡大する場合のものである。
- 2) 安全弁などの過圧抑制装置に代表される安全設備や安全装置が高い信頼性で作動するのであれば、プラントのハザードポテンシャルやリスクとの関係を考慮して、評価すべき事象を選定すべきである。

4.4 構造健全性確保の考え方の提案

4.4.1 構造規格の体系

プラント機器の構造健全性の確保とは、第 4.3 節に提案した(1)根本思想の 1)に従い、ライフサイクルに渡って要求される性能や機能を適切な裕度をもって達成し、維持することである。一般的な言い方をすれば、適切な品質の確保である。品質を確保すること、すなわち、品質保証のためには、負荷荷重に対して破損しないような適切な板厚を有すること、有害な欠陥が生じないように製作すること、検査して有害な欠陥がないことを保証すること、異常な荷重が負荷しないように適正な運転管理をすること、など技術的に適正であることが必要不可欠であるが、それだけでは十分ではない。建設段階、使用段階に携わる人間が適正な技能、知見を有していないといけない。さらに、しっかり責務を果たそうとしても、そうは思っていない間違いを犯すのが人間である。このように、プラントの適正な品質の確保、保証、さらにはたゆまぬ向上の努力は、下図に示すように、最新の技術、人的な能力の向上、倫理感の醸造に支えられて実現できるものであり、高度化が可能となる。



品質を支える最新技術、能力向上、倫理感

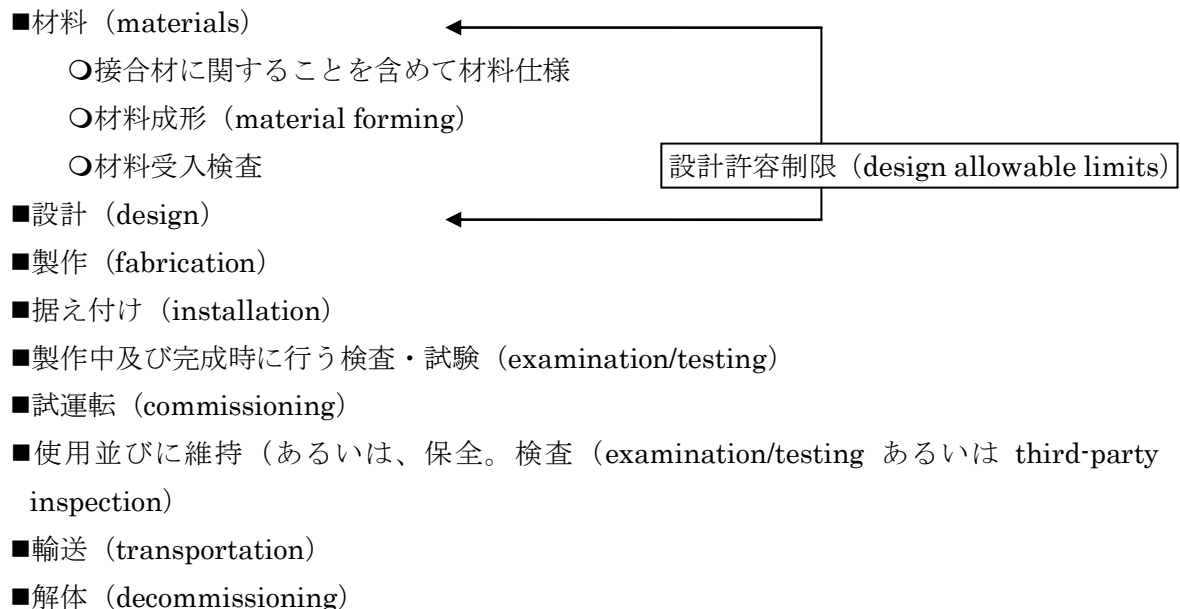
従って、構造健全性確保のためには、技術的な観点からの品質確保だけでなく、人間のクオリフィケーション（人間の集団である組織としてのクオリフィケーションも含むのは当然である。現在の認証・認定に対応するであろう）の向上、倫理の醸造が不可欠である。これを構造規格の体系として考えるのが望ましい。

ところで、高延性材機器から脆性材部品までを体系的に考え、これらを対象として一つの体系に包含した規格を構築しようとする場合に考えておかなければいけないこととして、これらの材料を用いた機器、部品の構造健全性確保の考え方がお互いに異なるので、間違っって別の考え方を適用することを防ぐことである。あるいは、経年変化の結果として延性が低下しており、中間的な延性材機器に適用する考え方を考慮する必要があるのに、それをせず（意図的、あるいは、うっかりにせよ）高延性材機器の考え方で建設、使用を進めてしまうことを防ぐことである。具体的な体系化を考えるとときに考慮しておく必要があり、今後の課題である。

4.4.2 考慮すべき技術工程

機器のライフサイクル（建設段階及び使用段階）を構成する工程は、技術的な面に限れば、模

式的には **Fig. 4.5** のようになろう。本図に示す工程は大分類レベルのものを示しているが、このレベルでは、材料が高延性材でも脆性材でも変わることはない。結局、延性の如何に係らず構造健全性の確保を図るためには、下記の項目について規定を定める必要がある。構造規格は、これらの項目から構成されることになる。



以下では、中間的な延性材機器の構造健全性確保を図る考え方、さらには、中間的な延性材機器に限らず高延性材機器、脆性材部品までを対象とする場合に体系的に考えるとどうなるかについて、上記のなかの重要な項目に対して提案する。ただし、断っておかなければならないが、この提案は、著者がこれまで高温ガス炉機器、そして核融合施設機器について構造規格を考えてきた経験、知見から思い描いてのものである。これらの妥当性確認あるいは必要に応じての改良のために、これから研究開発を行っていく必要があることは言うまでもない。

4.4.3 材料について

一般論

材料について規定すべきことは、設計上、材料に対して課されている要求であり、あるいはまた、製作にあたって前提としている製品材料の品質を保証することである。具体的には、製品材料をどのように作るか、という材料仕様、素材を製品化するために行う加工が品質を損なわないようにすること、そして、受け渡す製作者 (manufacturer) に対して製品として品質が確保できていることを保証することである。すなわち、キーワードとしては、上述したように、

- 材料仕様
- 材料成形 (material forming)
- 材料受入検査

ここで、材料仕様は、これに従って生産すれば、その製品材料は設計が前提としている、あるいは、要求している機械的性質などを満足しており、そして、製作者が製作工程において品質が確保されるような適切な製作を行えば完成機器や部品が製品品質を確保できているように、そのための要求事項を記述している。ただし、規格としての材料仕様は、特定の機器を対象にしている

わけではないので、必要最小限のことを記述すべきであろう。個々のプラントに特有な要求は、契約仕様書などにおいて材料仕様として追加されるべきであろう。

中間延性材を考慮した体系的な考え方

高延性、高靱性の材料を用いた機器においては、現行の規格に従って材料生産、機器の製作が行われるのであれば欠陥が存在したとしても微小であり、塑性変形による抑制効果があるので欠陥の進展を考察する必要性は薄い。また、繰返し負荷条件にあっても、現実的に生じうる応力条件下ではき裂発生がないことがわかっている。万が一繰返しにより欠陥が進展しても、欠陥が機器の壁厚さ方向に貫通するまで安定に進展し、貫通した時点でも進展が不安定化する可能性は低い。このような場合には、貫通した時点で何らかの予兆（流体を内包する機器の場合には内包流体の漏えい）が生じ、カタストロフィックな破壊に至る前に対処する余裕がある。以上のことから、材料受入検査や完成検査において検出した欠陥は除去するとして、検出限界以下の欠陥が存在するとしても実質的に無欠陥として構造健全性の確保を考えることは合理性がある。

これに対して、延性、靱性が低い、あるいは、初期には高延性であっても経年変化により延性、靱性が低下し、ある限界を下回っていると（例えば、欠陥（き裂）の安定進展条件）、1回の負荷でも欠陥が進展し、その進展が不安定化して急速破壊することがあり得る。また、繰返し負荷により欠陥が進展してしまい、この進展過程で、貫通する前に不安定化して急速破壊してしまう可能性がある。このような場合には、漏れなどの予兆が何ら起こらず突然に大きく破壊してしまい、カタストロフィックな破壊と言える。

もし、何の予兆もなく突然にカタストロフィックな破壊を引き起こす可能性があるような条件で使用しなければいけないとしたら、欠陥をコントロールすることを考えなければいけない。すなわち、経年変化により劣化する場合にも初期段階から、有害な欠陥が発生しないように徹底した品質管理を行うだけでなく、欠陥を定量化し、進展可能性を把握しておく必要がある。すなわち、完成検査や使用中に限らず材料受入検査においても欠陥の検出にとどまらずサイジングすることが求められる。

従って、中間的な延性を示す材料を用いた機器において、存在しうる欠陥が現実に関起り得る応力条件の下で有害化し、1回の負荷でも、あるいは、繰返し負荷によりカタストロフィックな破壊を引き起こしうるとしたら、欠陥のコントロールを考えなければならないということになる。

それでは、体系化して考えて、どのような場合に欠陥のコントロールを考える必要があり、材料受入検査においてさえ欠陥のサイジングが求められるのであろうか。それに対する著者の考えを Fig. 4.6 に示す。最初に考えることは、1回の負荷でも Fig.4.1 の下段に示した破壊、すなわち、存在する欠陥を起点として破壊が生ずるのであれば（それが、脆性破壊でも、若干延性的な破壊でも）、材料受入検査として欠陥を検出するだけでなくサイジングすることを求めるのは自然な要求である。この破壊が生ずるかどうかは、延性や切欠き靱性が劣化するだけだとしたら設計耐用期間末期、あるいは、運転終了時点における延性と切欠き靱性から判断するが、これには破壊力学の知見が必要になる。Fig. 4.6 には、簡便的な判断基準として、設計耐用期間末期においても延性（絞りで判断）が 10% レベル以上を確保しているかどうかと記述したが、これは、前述したように暫定である。結果的に 10% レベルになることは容易に推測されることではあるが、な

お、考え違いし易いので繰り返しておく、この判断は、許容される欠陥のサイズを判断する類のものではない。初期欠陥ではなく、塑性変形の結果として介在物などを起点として生ずるボイドなどがトリガーとなって生ずるせん断型破壊なのか、それとも、初期欠陥の進展を抑制するほどには延性が十分ではないため初期欠陥からき裂状に発生し、進展して、最終的に進展の不安定化条件が満たされれば急速破壊してしまうのかを判断するものである。後者と判断されれば、すなわち、Fig.4.1 の下側に進むと判断されれば、き裂のコントロールが必要なり、材料受入検査でも欠陥のサイジングが必要になるということを物語っている。具体的に言えば、最大荷重に対して不安定破壊する最大欠陥サイズがわかるので、材料受入検査では、この最大欠陥を超えていないことを調べるのが目的である。

この判断は、プラントの使用者であるオーナーが、どこまで使用したいかの要求と材料特性データから下すべきである。いったん判断が下されれば、それによって、設計や製作、完成検査だけでなく材料受入検査などを行うことになる。この判断は契約仕様書の冒頭に明記すべき重要な判断であり、十分な倫理感をもって下さなければいけない。まとめると、

「Fig. 4.6 に示す判断は、構造規格において、材料規格、設計規格、製作規格、検査・試験規格などライフサイクルを構成する全工程の規格の上位に位置し、それらの内容を指定する重要な判断である。この判断はオーナーが十分な特性データに基づいて下し、仕様書の最重要項目である。」

次に、繰返し負荷の場合には、高延性であれば、欠陥が発生しない、進展しないという考え方もできるが、低下してくるとそれに安住していられなくなる。欠陥が進展することを考えなければいけなくなり、欠陥の進展が安定かどうか、とりわけ貫通した欠陥が安定かどうか判断基準となる。欠陥がき裂状に進展し機器の壁を貫通する前に進展が不安定化する、あるいは貫通したときに負荷しうる荷重によって不安定化する可能性があるのであれば、予兆なしにカタストロフィックな破壊を生じることになる。従って、1回の負荷の場合と同じく、有害化しうる欠陥が生じないように品質管理を徹底するとともに、材料受入検査として欠陥のサイジングを行う必要がある。

詳しく述べると、欠陥が貫通したときに不安定化、あるいは貫通する前に不安定化する可能性があるのであれば、基本思想として提案したように、制御できる範囲に制限することを考えなければならず、すなわち、欠陥をコントロールできる状態に、ある裕度をもってとどめておかなければならない。これは、欠陥（あるいは、き裂）進展評価を行う必要があることになり、そのためには初期欠陥を把握する必要がある、材料受入検査においても欠陥のサイジングが求められることになる。なお、ここで注意しなければいけないことは、この考え方においては、欠陥が貫通することを認めているわけではない。万々がーにも貫通した場合にどういう状況を許容するか、という議論をしている。それに対し、貫通しても安定しているというのであれば、なにも欠陥（あるいはき裂）の発生、進展を定量化せずとも、疲労き裂が発生し、進展した結果破損に至ったトータルの結果を表している繰返し破損寿命を試験片から求め、種々の効果（データのばらつき、表面効果やサイズ効果など）を考慮して最小値を求め、この最小値で耐疲労設計するとい

う従来の経験則でなんら問題ない。特に、現設計法では、有意な欠陥の発生が防止できている。従来の疲労試験から得られる破損寿命を用いてよい背景には、万が一にも貫通しても安定であるような延性、切欠き靱性を有しているということが、試験片においては、最終的な局面に至るまで安定に疲労き裂が進展するということにつながっているということがある。逆説的に言えば、貫通する前に不安定になる場合には、疲労試験においてもある程度に疲労き裂が進展した段階で不安定になってしまう可能性があり、従来の考え方を採用しようとする、もっと裕度を増す必要が出てくる。

Fig.4.6 の枝分かれによって後段（設計、製作など）において採用すべき規定が変わってくる。材料規格においても、材料仕様では欠陥の発生防止を図ることを求める必要が出てくるし、成形においても細心の注意が求められ、特に、表面欠陥の管理が極めて重要となる。さらに、材料受入検査においては、上記で議論したことが求められる。

4.4.4 設計について

一般論

設計においては、所定の製品品質が使用開始時において確保されていることを前提として、機能確保が要求される使用条件について、設計条件として定める負荷荷重条件や環境条件などに対して耐用期間終了まで構造健全性を確保できるように、サイジング（形状、構造諸元などを定める）及び評価を行う。構造健全性として確保すべき品質水準は、要求される機能によって異なる。

構造健全性確保のための設計基本思想は、次のとおりとする。すなわち、想定する破損モードのそれぞれについて、それを超えると破損に至る力学的パラメータのうちそれに至るまでのプロセスが制御可能な最大のパラメータを限界力学パラメータ L (limiting mechanical parameter) とする。そして、この限界パラメータに対応し、外力として構造物に作用する荷重 (force-induced loadings) あるいは変形拘束などの結果として生ずる荷重 (deformation-induced loadings) により構造物内に生ずる内部変数的な力学的パラメータを S とする。ここで、制御できる最大のパラメータを選択する理由は次の通り。

- (1) 試験などから簡単に得られるなどの理由で最大でないパラメータ、最大パラメータに至る途中段階でのパラメータを限界力学的パラメータにしてしまうと、延性が大きく変化することで変形プロセスが変化し、そのパラメータが消えてしまう可能性がある。例えば、引張強度。こうなってしまうと、一貫して考えることができない。
- (2) 延性低下した場合などにおいて、最大パラメータと途中段階のパラメータとが近接してしまう場合がある。そうすると、適用している設計裕度の設定方法によっては許容値が逆転してしまい、途中段階のパラメータが無意味になる可能性がある。やはり、王道で考えるべきである。

限界力学パラメータ L と対応する内部変数パラメータ S の対応関係の例を下表に示す。

特性	限界力学パラメータ L の種類	対応する内部変数パラメータ S の種類
力	強度 (例えば、延性破壊であれば、破壊強度。引張荷重に対する塑性不安定であれば引張強度)	応力
変形	延性（変形能）	ひずみ、または変形
切欠き靱性	破壊靱性	例えば、応力拡大係数

L 、 S それぞれは、固有の不確かさやモデル化上の不確かさが存在する。さらには、設計ミスによる板厚不足、製造ミスによる不用意な欠陥、運転ミスによる過荷重なども考慮する必要がある。従って、限界力学パラメータの設計代表値（例えば、破壊強度データの統計的な最小値として定義する設計最小値） $L_{\min}$ 、内部変数パラメータの設計代表値 S^* に対してそれぞれ設計裕度 β_L 、 α_S を考慮して、構造健全性を確保するとは、下式を満足することとする。

$$\frac{S^*}{\alpha_s} \leq \frac{L_{\min}}{\beta_L} \quad (4.25)$$

この式自体はこれまで確率論的な設計手法として提案されているものと変わらない。著者の提案は、限界力学パラメータが、「制御できる最大のパラメータ」としていることである。これが一貫性のある、体系化を考える上で重要である。

なお、上式のように分離できるほどに統計的な検討ができず、破壊事故の統計的な整理しかできない経験ベースの場合には、設計裕度を DF として次式を満足することとするのが望ましい。

$$S^* \leq \frac{L_{\min}}{DF} \quad (4.26)$$

ところで、材料によって特性が大きく異なるとき、あるいは、1つの材料であっても経年変化の結果として材料特性が大きく変わるときには、設計するためには何をどのように保証すればよいのかを常に考えていることが重要である。例えば、初期状態での強度や延性などを保証すればよいのか、それとも、耐用期間末期の強度や延性などを保証しなければいけないのか。また、保証するとして、それは誰の責任でどのようにして。このことが他の工程に対する規格、材料規格、製作規格、検査・試験規格、維持規格などとの結びつきを定めることになる。

中間延性材機器に適用できる体系的な考え方

機器の構造材料についてその延性（や靱性）が大きく異なる材料を取り扱う場合、あるいは、経年変化の結果として延性などが大きく変化する場合は設計規格を考えるに際しては、各々の延性レベルにおいて

(1) どのような破損モードを想定するか

(2) 各モードの破損の防止は、それぞれの材料特性などを考慮してどのように図るかを検討するだけでなく、各延性レベル間である一貫した思想の下、体系的に考えることが重要であることは度々主張していたところである。

高延性材機器の場合と脆性材部品の場合については、これまでの考え方のレビューあるいは新しい提案を第2章及び第3章に述べた。ここでは、これまでの考察に基づき、中間的な延性材を使用する機器、あるいは、高延性材であったものが経年変化により延性、靱性が低下した場合の構造健全性確保の考え方を、一般論に示した考え方に従い、体系化を考慮しつつ提案する。

上記(1)、(2)について提案する前に、体系的に考えるということとはどのように考えることか、著者の考えを述べる。

体系的に考えるとは

体系的に考えること、あるいは、体系化を考えるためには、概念的な一貫性、あるいは、別の言い方をすれば、概念的な「連続的」を常に考えていることが必要不可欠である。すなわち、

- (a) 破損防止の考え方、ひいては構造健全性確保の考え方について、破損モードが異なれば不連続があるのは当然であるが、同じ破損モードについて、個々の延性レベルではベストであっても延性レベル間で見通してみると大きな不連続があり一貫性がないのは望ましく

ない。

- (b) 構造健全性確保の考え方において前提としていることに一貫性があること、さらには、その前提を保証するための考え方に一貫性があることが重要である。

想定する破損モード：提案は Fig.4.7、そして、カテゴリーE とカテゴリーP の振り分け基準は延性（変形能）が約 10%と推測

構造健全性を確保するとは、一言で言えば、要求される機能や性能が喪失することを適切な裕度をもって防止することである。構造健全性確保のための方策は、従って、機能や性能を維持できなくさせ、喪失させる現象、メカニズムの発生を適切な裕度をもって防止することである。要求される機能や性能を維持することができなくなり喪失することを破損と称し、破損を引き起こす現象やメカニズムを破損モードと称しているようである。これは、後述することから、弾性域を破ること、すなわち、塑性域に突入することを破損と定義する材料力学の通説と矛盾してはいない。

破損モードとしては、Fig. 4.7 に示すように、2つに大別できる。一つは、延性の如何に関係なく想定すべきモード、これは逆説的な見方をすれば脆性材のような場合でも共通して弾性域が存在することから弾性域のみの材料でも生じうる破損モードと解釈できる。もう一つは、材料に変形能があるため過大な塑性変形による機能喪失や塑性不安定化して荷重载荷能力を損なうモードが考えられる。前者をカテゴリーE（弾性域でも生じうるモードということ）、後者をカテゴリーP（有意な塑性変形が生じる場合に起こりうるモードということ）と、ここでは称する。ただし、材料に変形能がある場合には、カテゴリーP だけでなくカテゴリーE も破損モードとして想定すべきであることは当然である。なお、読者が混乱してしまう可能性もあるので、高延性材、中間的な延性材、脆性材との関係を明確にしておく。これまで2章、3章などにおいて延性の観点から3つに分類して検討してきた。その結果として、カテゴリーE とカテゴリーP との振り分け基準により延性の観点から2つに分類するのが適切であることを提案した。3つの分類と2つの分類との対応関係をまとめると、高延性材の場合には、カテゴリーP 側に属し、従って、破損モードとしては、カテゴリーP とカテゴリーE の両方を想定する（あるいは、カテゴリーP+E とした方がよいかもしれない）。脆性材の場合には、カテゴリーE 側に属し、従って、カテゴリーE の破損モードを想定する。中間的な延性材の場合について振り分け基準によって分けられ、高延性側がカテゴリーP 側となる。

（1）カテゴリーE

1) 破壊

延性あるいは靱性が十分ではないと、1回の荷重負荷（single load application）でも欠陥からき裂が発生、成長し、その結果、ある面で分離するため、荷重の载荷能力（load-bearing capability）がなくなる。破壊がへき開面で起こればへき開破壊であり、すべり面で起こればせん断型破壊である。単純な区分としては脆性破壊である。構造健全性確保の方策を考えると時の分類として、Fig. 4.1 に示す著者提案では、存在する欠陥が誘起する破壊である。

2) 疲労破損

繰返し負荷の結果として、欠陥からき裂進展し、最終的に壁面を貫通することにより漏えいなどが生じ、機能喪失する。き裂先端では塑性変形している場合が多い。

3) 弾性座屈

弾性応力範囲であっても、オイラー座屈で知られるように変形が不安定化し、過大な弾性変形を生じる。

4) 環境効果によるき裂の発生と進展

き裂先端が環境効果による腐食などの結果として進展し、貫通あるいは破壊に至る。

(2) カテゴリーP

第2章で議論したように、過大な塑性変形、あるいは、塑性変形ゆえに生ずる塑性不安定化などによる荷重載荷能力の喪失も機能喪失を引き起こすため、変形能がある場合には、下記の破損モードを想定し、その防止を図る。

1) 破壊

1回の荷重負荷 (single load application) でも相当量の塑性変形が進み、荷重が負荷したままであれば、介在物などを起点としてボイドなどが発生、成長し、合体してき裂を形成し、最終的に、すべり面で分離するため、荷重の載荷能力 (load-bearing capability) がなくなる。単純な区分として延性破壊である。あるいは、構造健全性確保の方策を考えるときの分類として、Fig. 4.1 に示す著者提案では、変形誘起型破壊 (deformation-induced fracture) が該当する。

2) 塑性不安定や塑性崩壊

1回の荷重負荷においてさえ変形が進行しても荷重が負荷し続ける場合には、引張荷重に対して塑性不安定条件を満たすまで荷重を加えると変形が際限なく増大し、その際にくびれの発生を伴うため、荷重載荷能力が減少し、最終的には喪失する。曲げモーメントの場合には、表皮応力が塑性不安定化条件を満たしても塑性不安定化することがなく、くびれることもないが、弾完全塑性体の場合には全断面が降伏する塑性ヒンジを形成すると、やはり塑性変形が進行してしまう。これを塑性崩壊と称する。実際に加工硬化する材料では生じないが、弾完全塑性体の場合に準じ、断面の大半の部分が塑性域に入ると弾性域に残っている領域が支えることができなくなると予想し、これを塑性崩壊と定義している。

この延長上に延性破壊がある。

3) ラチェット (進行性変形による機能喪失)

熱応力ラチェットや機械的ラチェットとして知られるように、定常応力下で繰返し応力が作用する場合に、その組み合わせがある条件を超えて板厚内に弾性核が存在なくなると、サイクルを通してみるとその断面の全面に渡り塑性変形が累積するというラチェットが生じる。サイクルごとに変形が進行することから、進行性変形と称し、過大な変形に至るため、その発生、あるいは、過大な変形に至ることを防止する必要がある。

4) カテゴリーEでも想定した破損モードにおいて顕著な塑性変形の効果

疲労き裂の場合には先端だけでなく広範囲にわたり塑性域にある。また、塑性座屈が生じる。これは、部材に生じている応力が降伏強さを超える場合の座屈である。このほかに、環境効果によるき裂進展への塑性効果などが想定しうる。

なお、カテゴリーPの破損モードとして、応力腐食割れ（stress corrosion cracking）に代表される環境効果により促進されるモードも想定すべきことは当然である。カテゴリーEにおいても同様なモードを想定しているが、ここでは、リストアップから外している。それは、カテゴリーEにおいては、対象となる材料のほとんどにおいて、大気条件においてさえその「環境効果によるき裂の発生と進展」を生ずる可能性があるからである。それに対して、カテゴリーP側を考えると、応力腐食割れ等は特殊な環境条件のみで生じるからである。これらの場合には、カテゴリーEでは設計対応ということになるが、カテゴリーPでは設計対応というよりも適切な材料選定を破損防止策として考える。このことから、本レポートでは、カテゴリーPの破損モードとして環境効果によるき裂の発生と進展は対象としないこととした。

Fig.4.7において、カテゴリーEだけを考えればよいのか、変形能があるためにカテゴリーPのモードも含めた両カテゴリーを想定すべきなのかを振り分ける判断基準が必要である。破壊の場合については、Fig.4.1に示したように、10%レベルの延性で分けることになると推測した。残る問題は、変形能を有するが故に想定するカテゴリーPとして想定する破損モードは、どのくらい以上の変形能がある場合に想定するのであろうか、ということである。

これについては、2つの側面から考える必要がある。一つは、自然な発想であり、変形するゆえの破損モードはどのくらいの変形能から想定すべきか、という側面である。もう一つは、脆性材で想定されたようなカテゴリーEの破損モードはどのくらいの変形能がある場合まで想定すべきであろうか、という側面である。

一つの例で考えると、脆性材の破壊は全応力に関してある最大応力点に最大欠陥サイズを考えると時の応力拡大係数が破壊靱性を超えれば起きてしまう。このようなあるポイントでの全応力が引き起こしてしまうような場合には、変形能が小さく、繰返し負荷により変形の累積として生じるラチェットや塑性疲労き裂などを考える必要はない。しかし、変形能が大きくなると、き裂進展停止（crack arrest）が生じうるので応力分布がもっと広がりを持っていないと破壊が生じなくなってしまう。一次応力あるいは二次応力との和がある条件を満たしていないとき裂からの破壊が起きなくなってしまう。さらに変形能が大きくなると、もはや初期に、あるいは既に存在するき裂を起点とした破壊ではなく、変形を引き起こす転位などを原因とする欠陥形成とそれを起点とする破壊の方が優勢となってしまう。上述の側面とは、最初の側面は、どのくらいの塑性変形が生じるようになれば、変形を原因とする欠陥形成とそれを起点とする破壊が優勢となるか、ということである。もう一つの側面は、この例では二つの段階が考えられる。一つの段階は、全応力がポイントで限界値を超えることで破壊を引き起こすのはどのくらいの延性までであるか、ということである。あるいは、別の段階として考えられることは、既に存在するき裂が破壊を引き起こすのはどのくらいの延性までであるか、ということ、これは、最初の側面の逆説的な見方であるが。これらを考慮して、カテゴリーPとカテゴリーEとの振り分け基準を決めることになる。

これらの延性、あるいは変形能を考えると、構造不連続部における塑性拘束による延性低下や延性への多軸効果などを考慮する必要があることは当然である。

本件は、今後、詳細に検討していく必要があるが、おそらくは、延性で 10%程度が振り分けの判断基準になると著者は推測する。この推測を Fig.4.7 の振り分け内に記載している。

設計手法：「解析による設計」手法を用いる

以下に示すいくつかの理由から、「解析による設計」手法を当面は用いざるを得ない。また、将来的に実績が増えて基本的な関係公式に集約することができれば「公式による設計」も可能になると考えられるが、高延性材、中間延性材、脆性材をカバーする体系的な考え方としてそのような関係公式を導き出すのは安全側になりすぎて現実的でないと考える。

- (1) 想定する破損モードが延性(あるいはさらに切欠き靱性)によって大きく異なる。従って、破損モードごとに破損防止を考えるべきであろう。
- (2) さらに、各破損モードについてさえ、評価すべきパラメータ(例えば、応力や荷重)の内容が延性によって異なる可能性がある。例として、上述したように、完全脆性であって靱性に比べて高強度な材料では、一次応力、二次応力だけでなく構造不連続部において生じるピーク応力によっても、その応力発生範囲がき裂進展不安定化サイズを大きく上回る結果、脆性破壊を生じてしまう可能性がある。しかし、延性(あるいは変形能)が増すに従い、限定された範囲に発生するピーク応力が脆性破壊を引き起こす可能性は低くなる。それゆえ、黒鉛構造物では脆性破壊を評価する応力は一次応力と二次応力に限定している。従って、評価パラメータとしてどのような内容を評価すべきか合理的に考慮して破損防止を図るべきである。例えば、評価パラメータが応力の場合には、評価すべき応力の種類に対して破損防止を図るべきであろう。
- (3) 許容応力を策定するための限界強さなどの限界パラメータは、制御できるパラメータの中の最大パラメータという思想に基づいて選択すべきである。個々の破損モードごとに限界パラメータは異なるので、あるいは場合によっては、荷重の種類によっても異なるので、これらを考慮して合理的な破損防止を図るべきである。
- (4) 破損防止を図る上で評価対象とすべき事象の考え方は、プラントに共通ではない。原子炉設備の場合には、発生頻度が極めて稀な事象であっても極めて甚大な損傷を引き起こす可能性があるので、計画的に起こる運転状態Ⅰから安全設計上の前提を保証するために想定する極めて稀にしか発生しない運転状態Ⅳまで、あるいは、供用状態 A~D を想定する。しかし、これは、ハザード曲線(発生確率とハザードポテンシャルとの関係)においてクリフエッジ(cliff edge)がなく、シビアアクシデントまで想定しなければならないからである。このような状況はプラントに共通ではない。例えば、著者と橋本が発案し我が国におけるトカマク型核融合施設の安全確保の考え方となった例では、プラズマはそもそも制御不安定なものでありこれを制御して運転していることなどに起因し、いわゆる事故を想定する必要がない。従って、評価対象事象は、プラントの安全上の特徴、安全設計の考え方などによって異なる。プラントの特徴を考慮して評価対象事象の選定とカテゴリー分け(例えば、現行の供用状態分類)を合理的に実施すべきである。

このように、「公式による設計」手法の根本思想である、基本的な応力に基づき 1 つの基本公式により手計算レベルでサイジングすることで破損防止を図り、構造健全性を確保するという考

え方にはそぐわない。破損モードの特性などを考慮して評価すべきパラメータを合理的に選定し、選定したパラメータに対してサイジング、評価を実施すべきである。これを満たす設計手法は、必ずしも「解析による設計」手法ほど詳細な解析に基づく必要はないが、現状では「解析による設計」手法が適切であろう。

破損防止の考え方：

高延性材機器の場合には、各モードの破損と、それを引き起こす応力成分の種類との対応が明確に分類できるので、破損防止策ひいては構造健全性確保の考え方は、破損モードごとに分類しても、分類した応力成分の種類ごとであっても整然と分けて考えることができた。しかし、これまで議論してきたことから明らかなように、中間延性材機器を中心に高延性材機器から脆性材部品まで一貫した体系的な考え方を探求しようとするとき、あるモードの破損を引き起こす応力成分の種類が延性の高低によって変わる場合がある。典型的な例が上述した脆性破壊の場合である。そこで、破損モードごとに破損防止の考え方を提案する。

(1) カテゴリーPの破損モード

1) 塑性変形起因の破壊（従来、延性破壊と称している形態に概ね対応）

(a) 検討

これまで本レポートにおいて度々議論してきたように、限界強さ（limiting strength）が荷重の種類によって異なる。まず、引張荷重のように、断面に渡って一様な応力を生ずる場合を考える。すなわち、膜応力的な応力分布を生ずる荷重である。この場合には、限界強さに近づく過程での現象が断面に渡って生ずる可能性が高いため、曲げモーメントの場合のような逃げ場がない。従って、塑性不安定が生じると、全面に渡って塑性不安定が生じ、不安定化して無制限に変形が進行する過程でボイドの生成、成長、合体が生じ、延性破壊する。従って、塑性不安定開始点での強度が限界強さということになるが、実際はもっと複雑である。公称応力－ひずみ曲線上において、降伏した後にはまず加工硬化する場合には、塑性不安定開始点はその先であり、開始点までは変形を制御できるということになる。それに対して、降伏開始したら、即、見掛け上加工軟化してしまう場合には、降伏開始点における真応力－ひずみ曲線上での硬化率が塑性不安定開始条件を下回っているということである。この場合には、変形を制御できるのは降伏強さまでということになる。

これに対し、曲げモーメントのように、発生する応力の分布が不均一であり、ある程度塑性域になっても弾性域が存在する（特に、中央部に弾性核として）荷重がある。この場合には、弾性核の領域が、塑性域の拡大による塑性変形の急激な進行を抑制する効果を持ちうる。このような場合には、曲げき裂が発生し破壊に至る手前ぐらいまで安定に変形が進む。また、曲げモーメントが負荷する場合には、塑性不安定がある点で生じてでも全面には拡大しない。周りから拘束されてしまう。曲げき裂の発生点、あるいは、圧縮側での分岐発生点での応力が制御可能な限界強さとして考えられる。これらの応力（表皮応力）は、前述から、おおむね、破壊強さの値と同程度と推測される。従って、曲げモーメントの場合の制御可能な最大の限界強さは、破壊強さでよいと考えられる。

現行の規格においては、高延性材を使用することを前提として、前述したように種々の理由から塑性崩壊を破損モードとして考え、極限解析による塑性崩壊荷重を限界荷重的に考えている。この考え方自身の適切さはともかく、高延性においては延性破壊モーメントは塑性崩壊モーメントよりもはるかに高いことから、正当化されてきている。しかしながら、**Fig.4.3**に示したように、延性が低下し、かつ、真応力—真ひずみ（対数ひずみ）関係において降伏開始応力と破壊強さとの差が小さくなってくると、極限解析による塑性崩壊荷重では不適切となる。高延性から中間延性、特に低延性まで含めて体系的に考えようとするならば、本質で考えるべきであり、上述の考え方となる。

(b) 提案

以上から、塑性変形起因の破壊防止の制限式として、荷重レベルで考えると次式を提案する。

(a) 膜応力を断面に渡って生じる引張荷重様荷重 F に対して

$$F \leq A_F, \quad A_F = R(\sigma = \sigma_{us}) / \alpha_F \quad (4.27)$$

ここで、 A_F は、引張荷重に対する抵抗（限界強さとして塑性不安定を生ずる応力 σ_{us} ） $R(\sigma = \sigma_{us})$ から求まる許容荷重。 α_F は設計裕度。 σ_{us} として、降伏開始点においてまだ塑性不安定開始点に達していない場合には引張強さを用いる。既に塑性不安定開始点に達して見掛け上加工軟化する場合には、降伏強さを用いる。

(b) 曲げモーメントに代表される、不均一応力分布を生じ形状効果（あるいは面積効果）を有する荷重 M に対して

$$M \leq A_M, \quad A_M = R(\sigma = \sigma_f) / \alpha_M \quad (4.28)$$

ここで、 A_M は、曲げモーメントに対する抵抗（限界強さとしては、表皮応力が破壊強さ σ_f ） $R(\sigma = \sigma_f)$ から求まる許容荷重。 α_M は設計裕度。

一般的には、引張荷重と曲げモーメントが荷重の成分として重畳する。では、この場合について、引張荷重成分にどの程度の曲げモーメント成分が重畳すれば塑性不安定化するのか。あるいは、逆に、引張荷重と曲げモーメントが重畳したときの表皮応力が破壊強さに達したら曲げき裂が発生するのか。これらを明らかにする必要があるが、著者の知る限り、そのような見当は見当たらない。一方、設計用の制限式という観点からは簡便さが重要である。両者が重畳する場合の破損に対する相互作用が、実際には複雑であつてもなるべく線形和を出発点として表わすのが望ましい。さらに、実際には線形和で近似できる場合が多い（例えば、相互作用として代表的なクリープ疲労相互作用の場合には、ハステロイ XR などのニッケル系合金の場合がよく知られている）。そこで、下式を制限式とすることを考えることを提案する。

$$\frac{F}{A_F} + \frac{M}{A_M} \leq 1 \quad (4.29)$$

もし、非線形的な相互作用が強い場合（例えば、クリープ相互作用としてオーステナイト系ステンレス鋼の場合のように）には、左辺を複雑な関数表示するのではなく左辺はそのままで、右辺の 1 を、相互作用を表す B に変えて次式とし、

$$\frac{F}{A_F} + \frac{M}{A_M} \leq B \quad (4.30)$$

Bを両者の関数として表わすのが設計者にやさしい表現方法である。あるいは、相互作用が簡単な関数で表わされるのであれば、例えば、両者の自乗和など、左辺をそれを持ってきてもよい。

ここで、表皮応力が破壊強さ σ_f におけるモーメントあるいは発生応力そのものは、大変形解析から求める必要がある。それは、断面積の変化、形状の変化を適切に考慮する必要があるからである。

なお、高延性であれば、表皮応力が破壊強さに達した時の曲げモーメントは、前述した極限理論から求める塑性崩壊モーメントよりもはるかに大きい。大変形弾塑性解析は、昔に比べればはるかに容易になっているがそれでもまだ簡単ではない。このことを考えると、設計耐用期間末期においても高延性とみなせる場合には、代替として従来規格を適用することを許容すべきである。従来規格としては、ASME B&PV Code Section VIII, Division 3 が推奨される。なお、ここでの高延性の条件であるが、Division 3 が適用できる範囲であり、現実的には、降伏比が1未満の場合となろう。この場合には、面積縮小率（絞り）でだいたい30%以上あると推測される。なお、降伏比が0.8を超えると、繰返し軟化が顕著に現れる場合がある。現状、繰返し軟化の許容されている度合いは、シェイクダウン制限が $2S_y$ であるところを $3S_m$ にしていることによって保証できるところまでである。これ以上に軟化する場合には、シェイクダウン制限や疲労損傷評価法などについて見直しが必要になる。

ASME B&PV Code Section VIII, Division 3 の手法は、引張荷重に対する許容荷重 A_F を求める場合には延性が低下しても適用可能であろう。しかし、 A_M については、曲げモーメントのみ負荷しているときに表皮応力が破壊強さになるときのモーメントを限界荷重として求めるべきである。ある許容応力を降伏応力として弾性線から求める2倍勾配法から求めるべきではない。

上述のことは、一般部に対する議論である。構造不連続部においては、別の問題も考える必要がある。構造不連続部に係る代表的な問題としては、降伏比が高くなると、構造不連続部におけるひずみ集中と一般部におけるひずみ（公称ひずみ）との関係が低降伏比（だいたい0.5くらい）とは異にするすることである。構造不連続部において破断延性（破断時の延性ということを明確にするために意図的にこの言葉を用いた。延性のことである）に達するときには一般部はどういう変形状態にあるかということである。降伏比が低いときには一般部でも降伏しているので構造物全体の変形をコントロールすればよい。しかしながら、降伏比が高くなると、さらには、延性が中間延性領域まで低下したりすると、一般部においてはまだ降伏に達していなくても構造不連続部においては破断延性に達している可能性がある。

このように、高延性でも降伏比が高い場合、さらには、中間延性材の場合には、構造不連続部における局所ひずみを評価することが重要と考える。しかしながら、延性としては引張試験の破断伸びではなく絞りの方がベターであることは前述したとおりであ

る。高延性材であれば、たとえ降伏比が1に近づいても絞りは十分に高いと推測される。その場合には、高延性の場合であれば、降伏比が高いからといって局所ひずみを制限する必要はなかろう。おそらくは、中間延性材であって絞りが20%レベルを下回る時に構造不連続部における局所ひずみの評価が必要になると考える。実験的な検証が必要であることは言うまでもない。

以上から、構造不連続部においては、上述の制限に加え、延性が20%レベルを下回るような中間延性材、あるいは、経年変化により20%レベルを下回る可能性があるのであれば、局所ひずみの評価が必要であることを提案する。具体的には下記を制限とすることを提案する。

「構造不連続部において、延性が20%レベル（要検証）を下回る場合には正の局所主ひずみ ε^* は、以下を満足すること。

$$\varepsilon^* \leq \varepsilon_f / 2$$

ここで、 ε_f は延性を表す。2は設計裕度である。」

2) ラチェット

(a) 現状の考え方と使用条件の苛酷化

ラチェットとは、応力サイクルごとに壁面に渡って正の塑性変形が累積する現象をいう。ラチェットを引き起こす荷重条件としてよく知られているのは、外荷重による膜応力が定常的に加わっている下で、変形制御型の応力が交番応力として繰返し作用する場合である。交番応力の1サイクルを通して見たときに当該壁面内の全面に渡って塑性ひずみが新たに累積する場合には、サイクルごとに塑性変形が累積し、進行性変形、すなわち、ラチェットといわれる変形挙動を生じる。この変形挙動が起きて、機能保持のために制限されている変形許容範囲を超えると、機能喪失に至り、すなわち、破損となる。

現行の高延性材機器を対象にした構造規格では、疲労損傷解析においてラチェットひずみの累積を前提としていないこともあり、シェイクダウンを生ずる応力の組み合わせ領域と塑性サイクリングと呼ばれる応力領域までに許容応力範囲を限定している。ここで、シェイクダウンとは、最初、発生応力が部分的に降伏強さを超え、塑性ひずみが生じたとしても、この残留応力効果などにより、数サイクル後には弾性変形にとどまる変形挙動をいう。ラチェットやシェイクダウン、許容応力範囲の詳細については、著者のレポート[4-16]を参考にされたい。

ラチェットによる過大な変形が引き起こす機能喪失を防止する現状の応力制限式は、応力-ひずみ関係として弾完全塑性体を仮定して構築されてきた。中間的な延性を示す材料においてさえ、真応力-真ひずみ（対数ひずみ）関係においては加工硬化（あるいは、ひずみ硬化）すると推測される。すなわち、塑性変形が転位の移動または双晶により引き起こされ、転位が動けば硬化していくと推測される。弾完全塑性体を仮定することは、実際には加工硬化するのであるから、許容応力範囲を安全側に策定することになる。このことは、延性が低下し、加工硬化率が低下してくると、この

設計裕度が減少することを意味する。さらに、もっとも重要な問題として、多くの中間延性材がそうであるように、著しく硬化した材料では、繰返し軟化(cyclic softening)の問題がある。これについては、後述する。

これらの問題を除けば、加工硬化するのであるから、弾完全塑性体を仮定した高延性材に適用している現状のラチェット防止の考え方は中間延性材機器に対しても準用できると考えられる。変形あるいはひずみの許容値を明確にする必要があるが。

しかし、それで良いのであろうか。著者は、近年登場してきた、あるいは研究段階あるいは開発段階にあるエネルギー生産システムの機器の使用条件を考えると、ラチェット防止策を検討する上で次の点について考慮する必要があると考える。

○高熱負荷化の要求はますます強まってきており、一層の高熱応力化を許容することが求められていること。

○定常的に負荷する外荷重として内圧を想定してきたが、一般的にはこのような引張荷重的な外荷重だけでなく、曲げモーメントなども負荷する。電磁力などの新しいタイプの荷重が出現してきており、一般化が求められること。

従って、改めて、そもそも論から考え直すことが望まれる。

(b) 検討

ラチェットによる過大な塑性変形を防止する考え方としては、大きくは、次の2つがある。

□方法Ⅰ：ラチェットが生ずることを許容する。ラチェット変形量あるいはラチェットひずみ量を制限する。

□方法Ⅱ：ラチェットが生ずることを許容しない。

方法Ⅰの考え方は、ラチェットひずみが生ずることによる疲労強度への影響も考慮し、ラチェット疲労として考えることが必要不可欠であることを意味する。

いずれにするか、あるいは、両論併記とするかを検討していくに当たっては、中間延性材に特有な問題点を考慮する必要がある。それは、中間的な延性を示す原因として次のことも考えられるからである。

■熱処理などにより硬化させた。

■使用中に照射硬化や熱時効脆化などとして硬化した。

これらの場合に繰返し負荷を受けると繰返し軟化が生じる。そうすると、硬化によりせっかく降伏強さが上昇したのに、降伏強さが低下してしまう。場合によっては、硬化する前の値に戻ってしまう(回復してしまう)。使用中に硬化する場合には、硬化と軟化を繰り返すあるいは混合した状態となるということがありうる。高延性材の場合には、低合金鋼の 2 1/4Cr- 1Mo 鋼のように繰返し軟化するとしても顕著ではなく、シェイクダウン制限を 2Sy に代えて 3Sm とすることや、内在する設計裕度などにより、初期の機械的性質を前提とすることができた。それを超えて軟化する場合にどうすればよいか。降伏強さが変化する場合に、繰返し変形挙動として新たな挙動パターンが出現するか、あるいはまた、ラチェット、シェイクダウン領域がどのように変わるかについて、過去に著者が検討している[4-17, 4-18]。

しかし、これらの検討は、硬化する場合についてであり、硬化と軟化の混合する場合については検討していない。非常に安全側には、使用期間中に最も低くなる降伏強さの値で設計耐用期間に渡って評価することが考えられるが、そもそも方法Ⅰを検討する理由に厳しい高熱応力化に対処するという要求があるわけであるから、現実的な解決策とはいえないであろう。文献[4-18]、[4-19]に示すような合理性のある発生事象の組み合わせに基づいてラチェットひずみやラチェット変形を計算することにチャレンジすべきである。

(c) 提案

ラチェットを許容する方法Ⅰを第1に考える。しかしながら、方法Ⅰはラチェット疲労評価法として確立することが求められるので、実現までには相当の困難さが予想される。代替として、方法Ⅱも検討しておくのが望ましい。方法Ⅰにおいては、中間延性材も考慮して許容ひずみ量または許容変形量の考え方を構築しておく必要がある。

ラチェット変形及びラチェットひずみの許容量は、次の考え方に従って定めることを提案する。

ラチェット変形に関する許容量：機能喪失を引き起こす変形量に対して設計裕度を考慮して規定する。これは、プラントごとに異なるのが一般的である。従って、当該プラントの特性を考慮してオーナーが契約仕様書などで規定する。

ラチェットひずみに関する許容量：下記の最小値として規定する。

- 規定するラチェット疲労制限式の適用範囲
- 規定を微小変形理論に基づいて構築している場合には、5%
- 延性に関し、設計裕度として2を採用して、最小延性値の1/2を局所ひずみ（正の最大主ひずみとして）の制限値。

ただし、上記の解析評価に当たっては、下記のこと十分に留意すべきである。

- 降伏強さが場所によって大きく異なる可能性がある（とりわけ、照射硬化と繰返し軟化の重畳する場合に）。この場合には、弾性追従を適切に評価する必要がある。
- 構造不連続部において、ひずみ集中による局所ひずみが破断延性を十分に下回っている（設計裕度としては2が適切であろう）ことを確認する必要がある。
- 溶接部などの接合部において、変形挙動が母材と異なることによる弾性追従を適切に考慮する必要がある。高温のクリープ設計では、溶接部の許容ひずみを母材のその1/2としていることに対応する。

3) 塑性疲労損傷

(a) 検討：限界パラメータは何か

そもそも疲労き裂が進展して破損する場合の、破損とは何をもって定義するかを

明確にする必要がある。試験片では破損繰返し数は、例えば、負荷荷重が 25%減少したときと定義している。しかし、これが実機における何と結びついているのか明確でないからである。これは、すなわち、限界パラメータは何か、を定めることにつながる。これが明確になれば、疲労損傷による破損を防止する考え方もおのずと定まる。

まず、き裂の発生、進展から考えてみる。繰返し述べてきたように、塑性変形はき裂進展を抑制する効果をもつ。これまでの知見を整理すると、疲労寿命 N_f までのき裂進展は、Fig. 4.8 に概念的に示すように、高延性材と脆性材とでは大きく異なる様相を呈する。高延性材機器においては、そもそもき裂の発生という場合にどのくらいのサイズになったときに発生したと定義するかに依るが、大まかに言えば、き裂の発生、そして進展は、疲労試験において破損寿命 N_f に至るまでのプロセスにおいてかなり後半になってから生ずる。これは、通常の金属であれば下限界応力拡大係数範囲（あるいは、き裂進展下限界） ΔK_{th} が極高サイクル疲労以外であれば数 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以上あることから推測できる。なお、下限界応力拡大係数範囲の意味するところは、発生したき裂であってもこれ以下の応力拡大係数範囲であれば停留するということである。相当に後半になって生じるのは平滑な疲労試験片の場合であるが、実機機器においても、き裂の発生は後半部分で生じている。それに対して、脆性材部品では、初期欠陥が不安定破壊を生ずる限界サイズよりも小さい場合であっても、かなり早い段階でき裂が進展し始めると推測される。

次に、き裂が進展していったこの状態を超えると機能喪失という最終的な局面も、高延性材機器と脆性材部品とは異なる。高延性材機器においては、前述したように、多くの場合は、き裂が板厚を貫通してもその進展はまだ安定である。不安定に進展し始めて急速破壊する、いわゆる不安定破壊するには、き裂がさらに進展する必要がある。従って、機器に加圧流体を内包していれば、多くの場合に LBB が成立する。炭素鋼などの場合に、貫通する前に不安定進展し急速破壊する場合もあるが。これに対し、脆性材部品では、初期欠陥が限界サイズよりも小さいとしても、板厚貫通に至るはるか手前のき裂サイズで不安定化し急速破壊してしまう。

なお、最近、高強度鋼などに生ずる極高サイクル疲労破損は内部き裂の進展によることがわかってきた。この場合に LBB が成立するかどうかは要検討である。

以上の議論から、高延性材機器、あるいは、中間的な延性にある材料を用いた機器（中間延性材機器）にあつて、塑性変形によるき裂進展の抑制効果が有意に期待できるときには、破損は、多くの場合には、漏えいによる機能喪失をもって定義するのが妥当であろう。多くの場合とは、加圧流体を内包し、LBB が成立する場合である。LBB が成立しない場合には、不安定破壊をもって破損と定義しなければならないのは自明であろう。貫通するときのサイクル数 N と N_f との関係は必ずしも明確ではないが、限界パラメータとして N_f 、限界強度として考える場合には疲労強度が妥当であろう。以上がカテゴリーP の範疇であろう。これに対して、脆性材のように塑性変形による抑制効果に期待できないときには、おそらくはカテゴリーE の範疇となる場合には、LBB には期待できず、不安定破壊を破損と定義する。そして、限界応力拡大

大係数あるいは破壊靱性値が限界パラメータとなろう。この場合には、不安定破壊の開始条件を把握することが必要不可欠となる。従来、高延性材機器の耐疲労設計として適用されてきた設計疲労線図法あるいは S-N 線図法ではこのことについて定量的な情報を提供しない。破壊力学に基づく評価が必要になる。ということは、欠陥に関する情報を必要とするので、必要な精度を有する欠陥検出・サイジングが必要不可欠となる。

破損について、中間延性材を含めて上記のようにできたとして、中間延性材の場合に耐疲労設計上特有なことが想定されるであろうか。考えられることとして、**Fig.4.8** から推測されるように、き裂の発生が早まることである。高延性材機器の耐疲労設計に用いる設計疲労寿命 N_D は、疲労データから回帰曲線（これを最適疲労設計曲線ということもあるが、最適という言葉はしっくりしない）を求め、これに設計裕度（サイクル数に対しては 20、ひずみ振幅あるいは応力振幅に対しては 2）を考慮して求める。この設計疲労寿命に達する以前にき裂の発生が起こる可能性があるということである。特に、実機においては、平滑疲労試験片よりも表面が粗いことやサイズ効果などから、疲労試験片よりも早期にき裂発生する。この結果、実機において、高延性材機器の考え方では許容される応力サイクル数でもき裂が発生している可能性がある。そうなると、いわゆる **No fatigue cracking** は成立しなくなってしまう。延性破壊の防止やラチェットの防止なども含めて、有意なき裂が存在することを前提として設計評価しなければいけなくなる可能性もある。しかし、これは現実的な対応とは言えない。有害な欠陥と考える必要がなければ、**No fatigue cracking** に準じて考えてよいのではなかろうか。では、有害とみなす必要のない欠陥、き裂とは何か、を明確にする必要がある。これは、今後、検討していけばよいと考えるが、例えば、破壊靱性値に対してある設計裕度を取り、最大き裂サイズに対し、設計耐用期間の間に作用するとして設計上想定する荷重での応力拡大係数がそれを下回ることなどが考えられる。このことが成立することを前提として従来の設計疲労線図を用いた耐疲労設計法を適用する。

(b) 提案

上記の検討から、**Fig.4.6** を提案する。ただし、中間延性材機器においてき裂の発生が早まり、 N_a において既にき裂が発生していると判断せざるを得ない場合がありうる。この場合には、最大き裂が有害かどうかを評価し、有害でないと判断できる場合に、高延性材機器に適用している耐疲労設計法が準用できる。有害と判断される場合には、破壊力学に基づく欠陥評価が必要となる。

(2) カテゴリーEの破損モード

破損モードとしては、**Fig.4.1** に示した、存在する欠陥起因の破壊である。それをさらに分類すると、第3章に記述したように下記の2つを想定する必要がある。

- 1) 初期欠陥が不安定進展する急速破壊
- 2) 使用中におけるき裂の発生と進展の結果としての急速破壊。その原因としては、疲労き

裂の進展（すなわち、サイクル依存のき裂進展）、あるいは、環境効果によるき裂進展（時間依存であり、第3章で述べた遅れ破壊が該当する）。

ただし、第3章にも人工ダイヤモンドの例で示したように、2番目の破損モードを想定する必要があるかどうかは、材料や環境条件、使用条件などを考慮して適切に判断する必要がある。

上記の破損モードを欠陥の観点からみると、Fig.3.1 として考えるということである。存在する欠陥（flaws or defects）の進展（あるいは成長）が不安定化して急速破壊することを防止する基本的な考え方は、逆説的な言い方になるが、Fig.3.2 となることを防止するということである。その詳細については、既に第3章で提案しているので、ここでは省略する。

設計裕度：

設計に限定せず、ライフサイクルを通して確保する品質水準は、大略、次のように表現できよう。

$$\boxed{\text{品質水準}} \cong \boxed{\text{設計技術、材料生産技術、溶接技術、検査技術など適用する技術や技能の信頼性の高さ}} \times \boxed{\text{各破損モードの許容範囲が有する裕度}}$$

各破損モードの許容範囲が有する裕度とは、表面的には、一般論の項で述べた設計裕度 α_s 、 β_L のことであるが、どの部分にその裕度がとられているかを考えると、次の3つの側面があると思われる。

- (1) 各破損モードの限界パラメータ L_{min} 自体が破損に対して有している裕度
これには、最小値が有する裕度もあるし、限界パラメータが制御できる最大のパラメータということで破損に対してある裕度を有している場合もあり得る。
- (2) 限界パラメータ L_{min} に対して許容範囲が有している裕度
設計裕度 α_s 、 β_L が該当する。
- (3) 内部変数パラメータ S^* の裕度ということになるが、設計評価手法に含まれる裕度
例えば、弾完全塑性体を用いて設計規定を構築している場合。

これらを総合的に勘案してリスクに対応する適切な設計裕度を設定すべきである。

しかしながら、これまでは、第2章でも述べたように、経験的に設計裕度を設定してきている。歴史的には、何らかの事（例えば、第2次世界大戦時における鉄鋼不足など）を契機とし、その時点においてどれだけ技術水準が向上したかなどを勘案して設計裕度の合理化が図られてきた。これでは、リスク概念を積極的に取り入れていこうとしている世の中にあって時代遅れとなる可能性があり、確率論として考えることが種々試みられている[4-20]。

これだけ品質管理が徹底し、構造解析技術などが進歩している世の中にあっては、設計裕度のさらなる合理化を考えるべきである。そのためには、ヒューマンエラーをどう考えるかという問題もあるが、強度データなどのばらつき、不確かさについて、確率論的に分析し、設計裕度としてどのくらいを考慮すればよいのか考え方を構築することがぜひとも望まれる。これが、さらなる技術革新のモチベーションにもなる。しかしながら、この場合に重要な課題の一つとして、

10^{-5} といった極低破壊確率をどうやって保証するか、ということがある。保証するために 10^5 回の試験を実施するのは現実的な解ではない。その一方、100 個程度のデータから外挿する場合には、外挿法の信頼性といった問題がある。このような極低確率での破壊確率を適切に評価できる確率分布は何か、ということについて、その解を見出すのは難しい。

このようなこともあり、不確かさの確率論的な分析から設計裕度を設定するというのは、現状では危険なことと言わざるを得ないであろう。

また、ヒューマンエラーの取り扱いも難しい。典型例が、スペースシャトルの爆発事故によるリスクの大幅な修正であろう。

ここでどういう方向で進めるのがよいか具体的に提案することはできない。著者はそれだけの十分な知見を持ち合わせていない。方向性としては、品質管理の徹底さや製造技術の信頼性の高さなどを不確かさの分析に反映できる道筋を考案し、これに基づいて不確かさを分析する。機器に求められるリスクの上限から、それぞれの要因による不確かさに対して有すべき設計裕度を設定する。これに、設計ミス、製造ミス、運転ミスなどのヒューマンエラー、人的要因の影響を加味して最終的には決定論的に設計裕度を決めていくことになると思われる。歴史的に分析してみることが重要と考える。

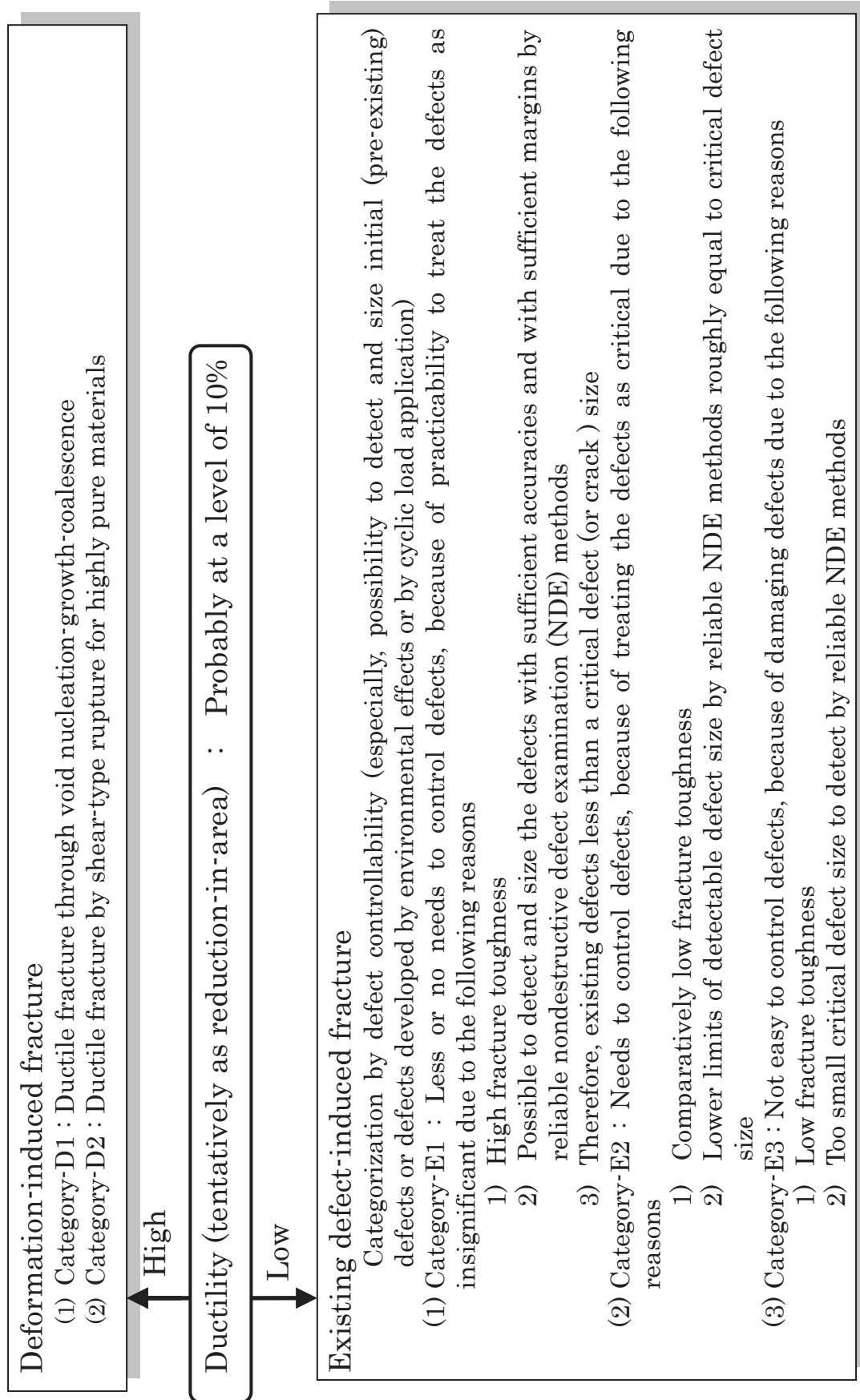
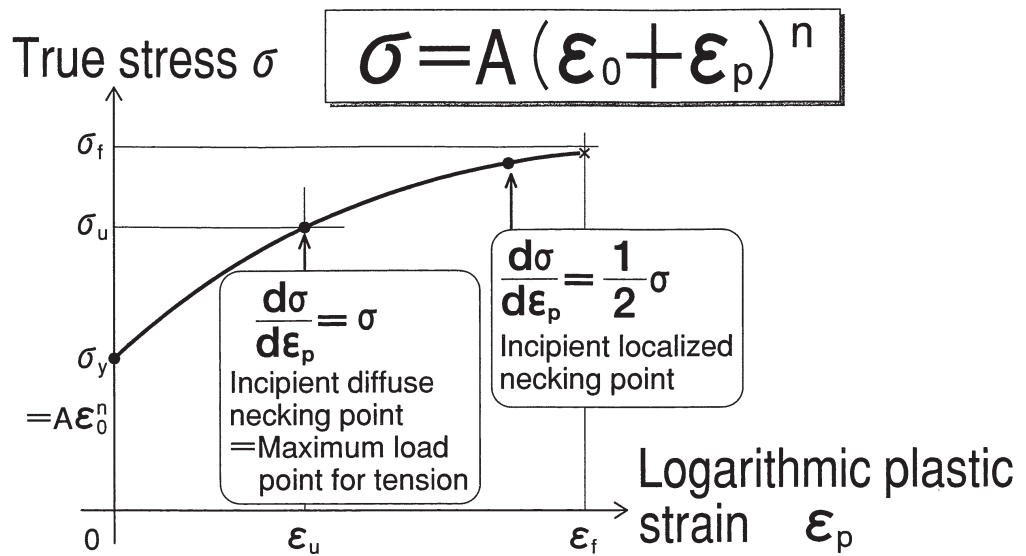
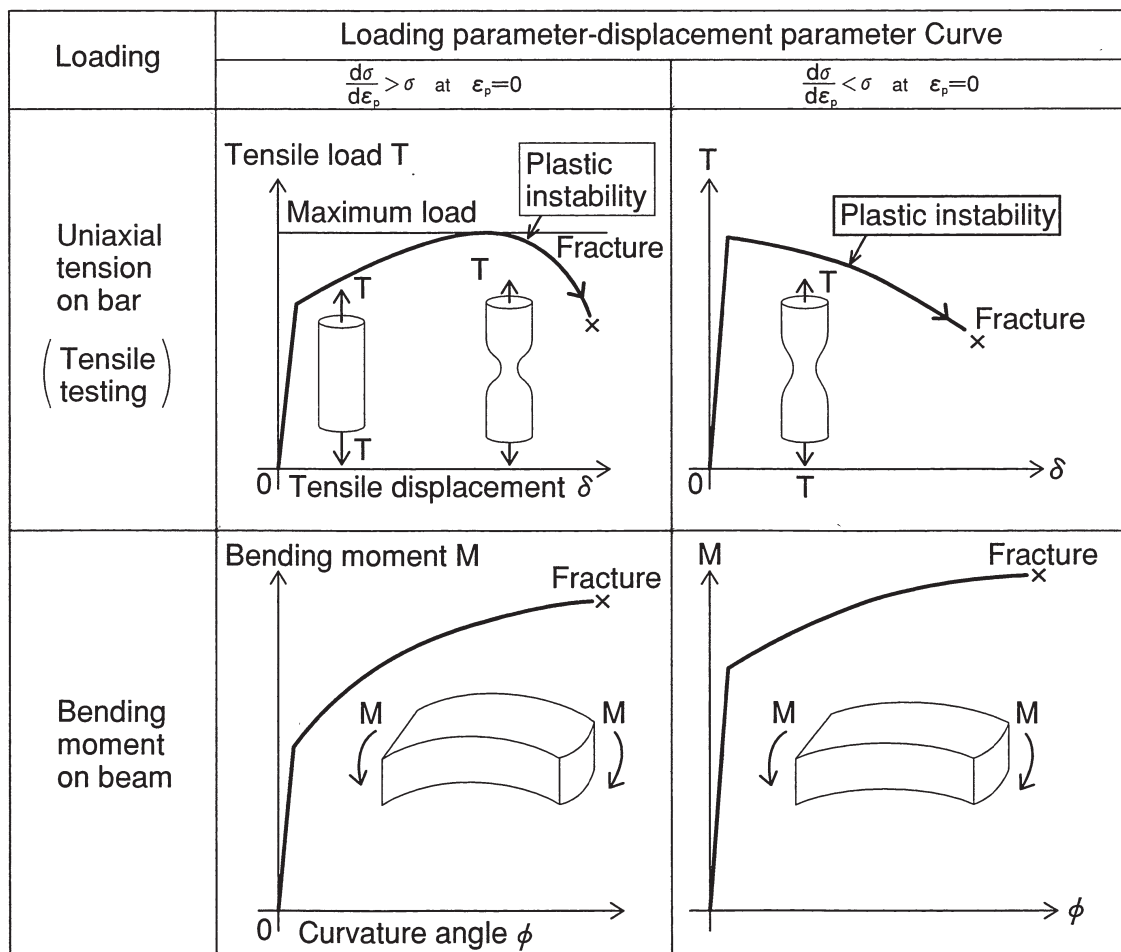


Fig. 4.1 Mechanistic and systematic categorization of fractures for structural integrity assurance



(a) True stress-logarithmic(true)strain relation (Swift's equation)



(b) Load-displacement curves depending upon true stress-true strain relations

Fig.4.2 Plastic instability for tensile loading but not for bending moment

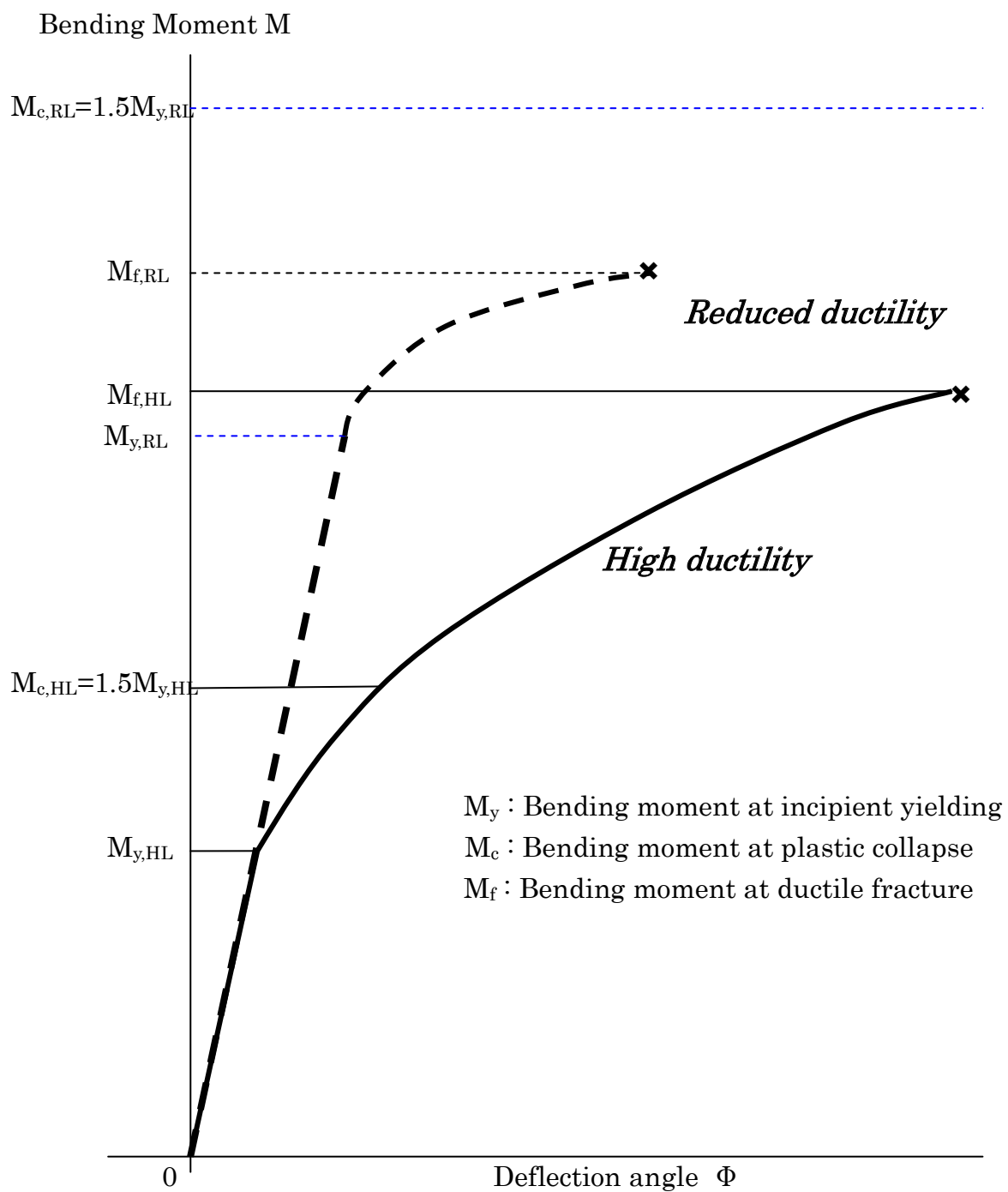


Fig.4.3 Conceptual illustration of bending moment diagram for reduced ductility

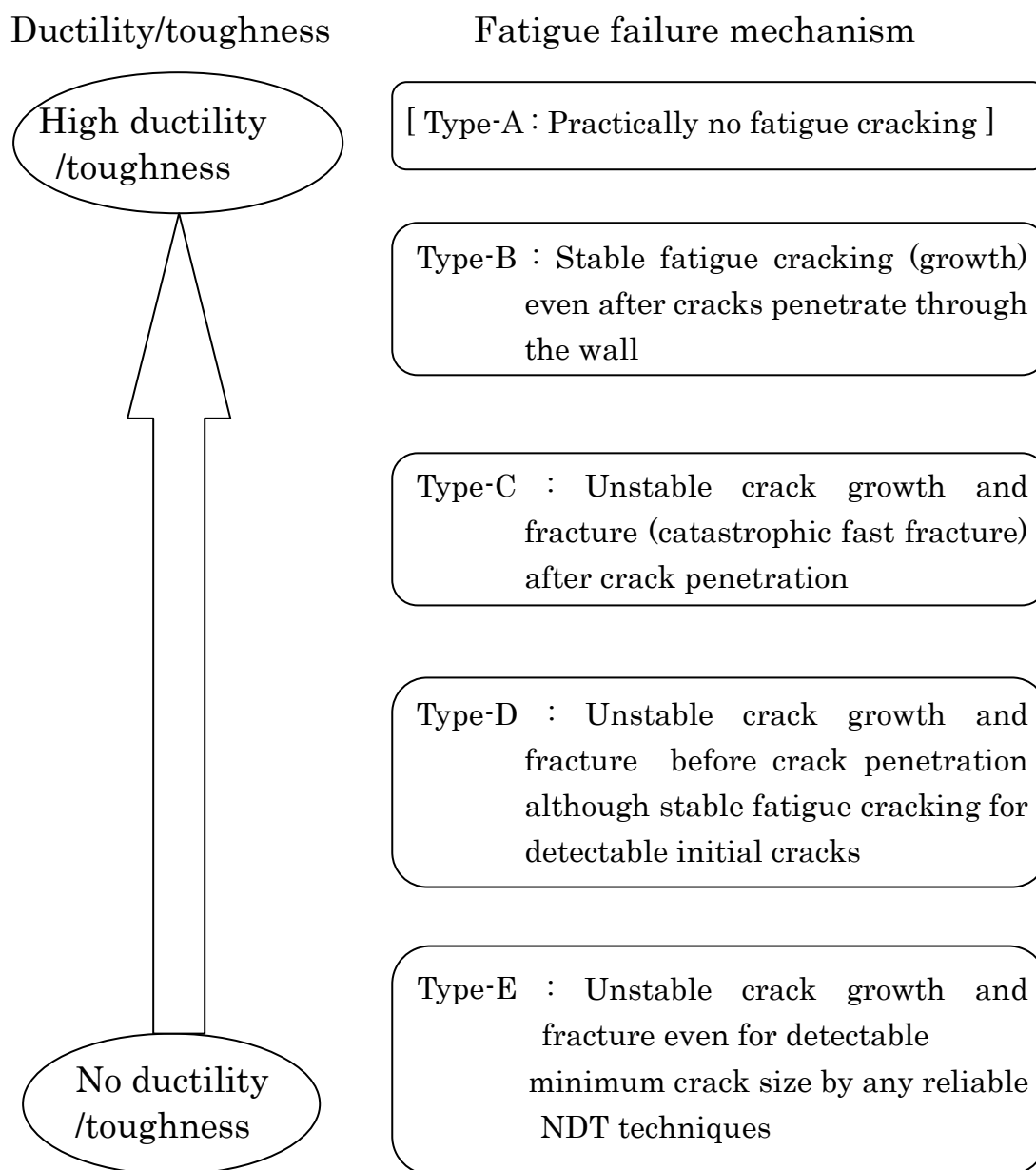


Fig. 4.4 Fatigue failure mechanisms as varied by ductility/toughness

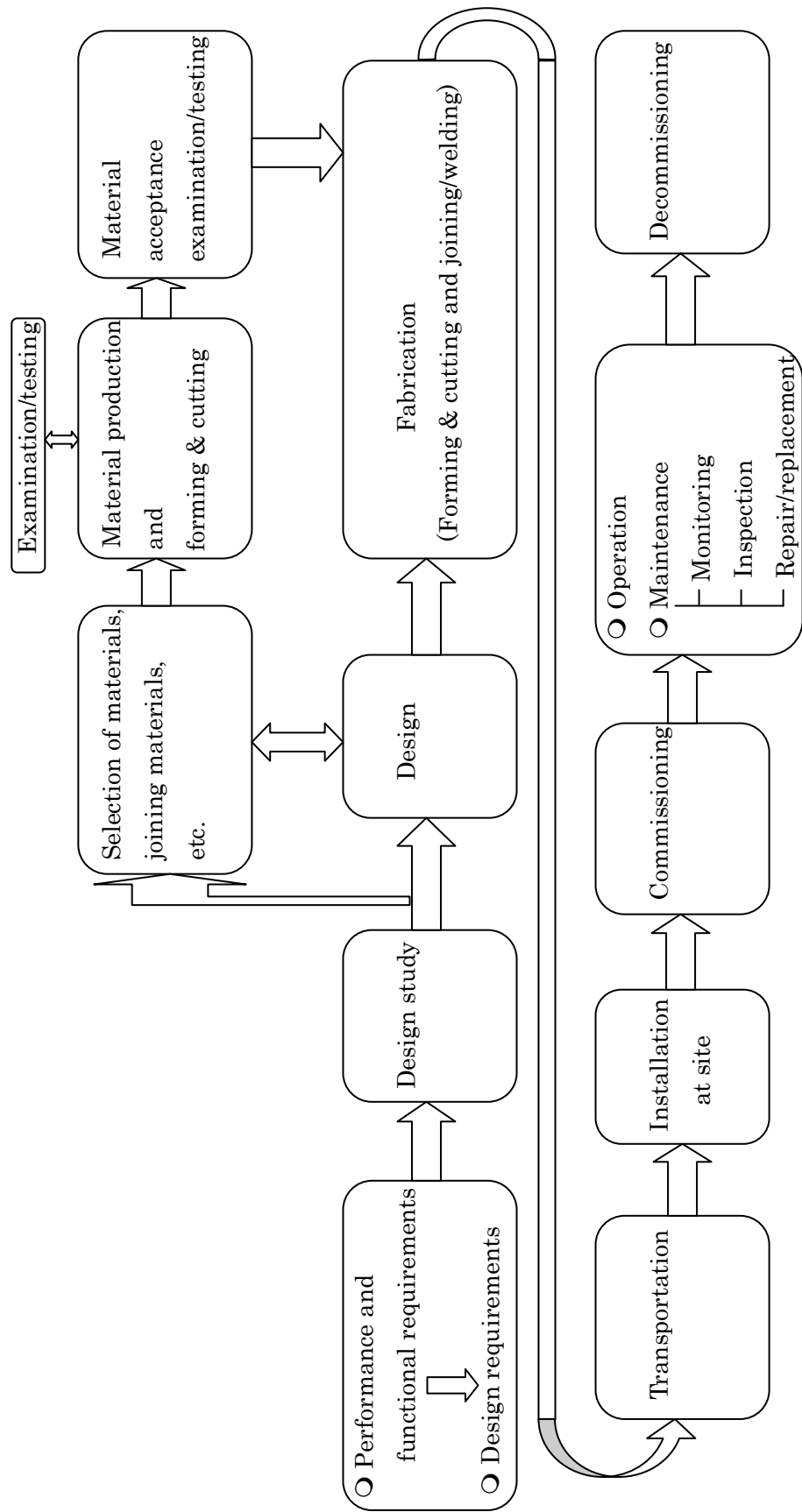


Fig.4.5 Schematic illustration of engineering stages in the life cycle of plant components

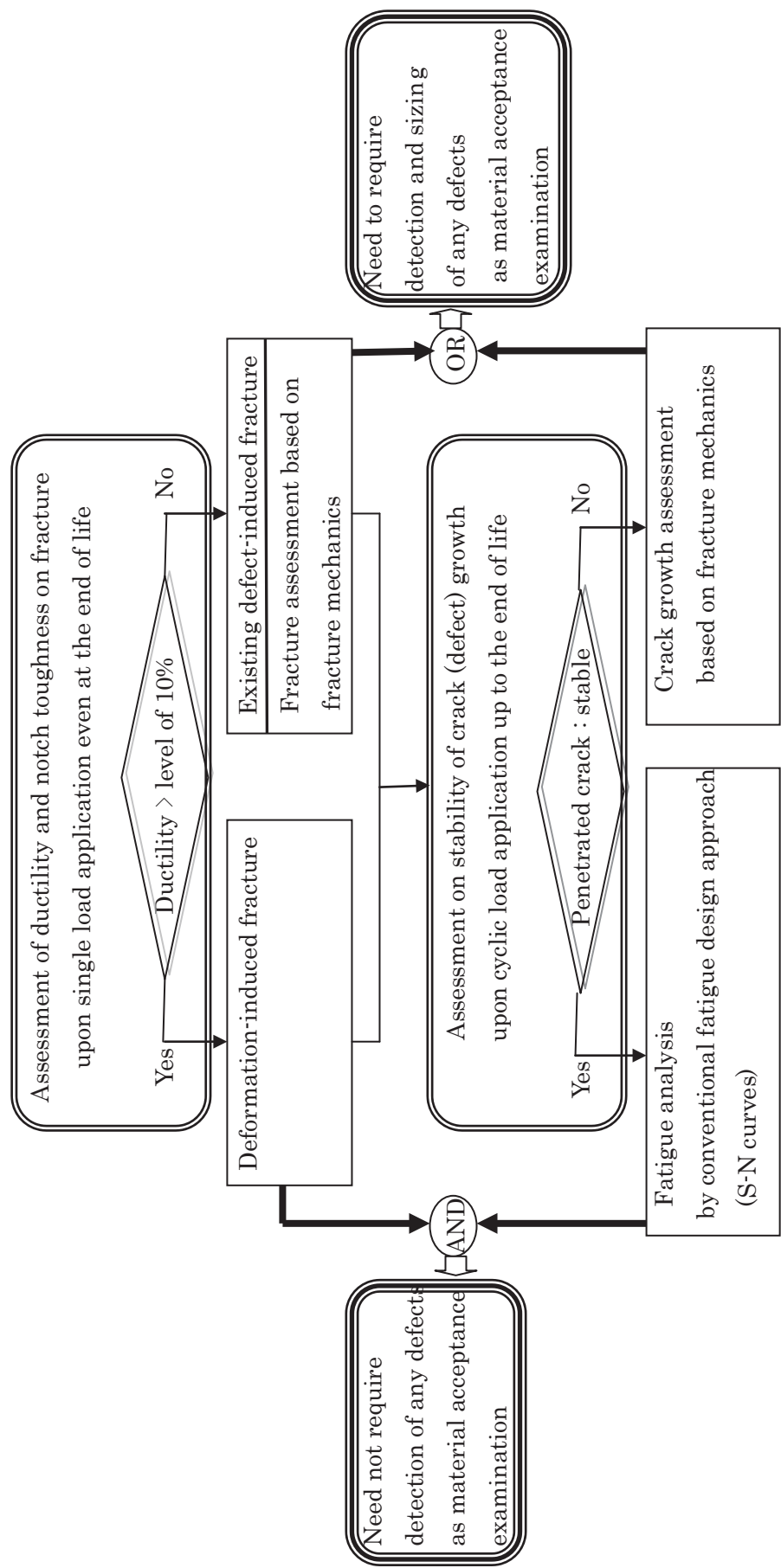


Fig. 4.6 Owner's responsibility to require detection and sizing of any defects as material acceptance examination/testing

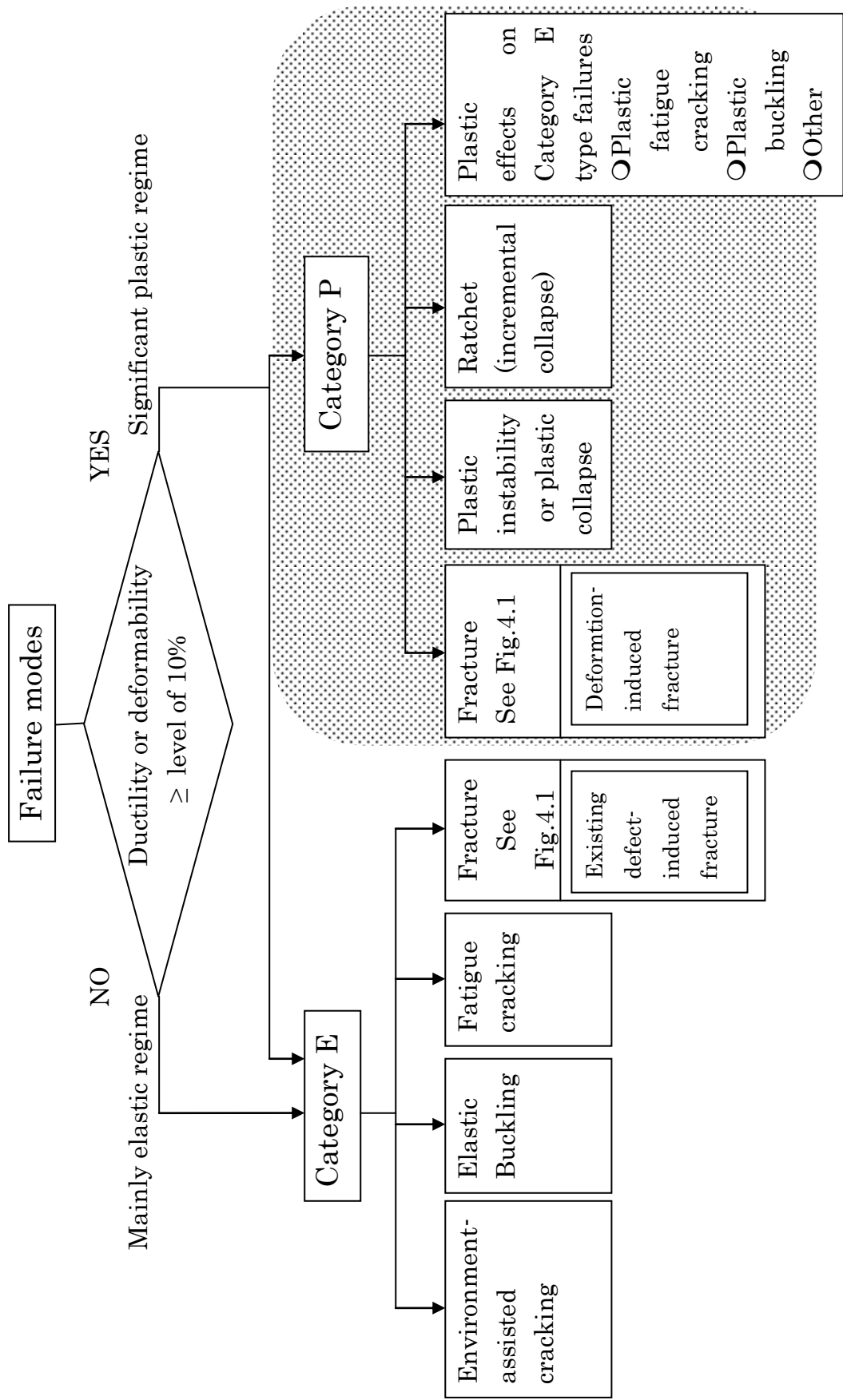


Fig. 4.7 Systematic concepts of failure modes, including application to structural components with reduced ductility

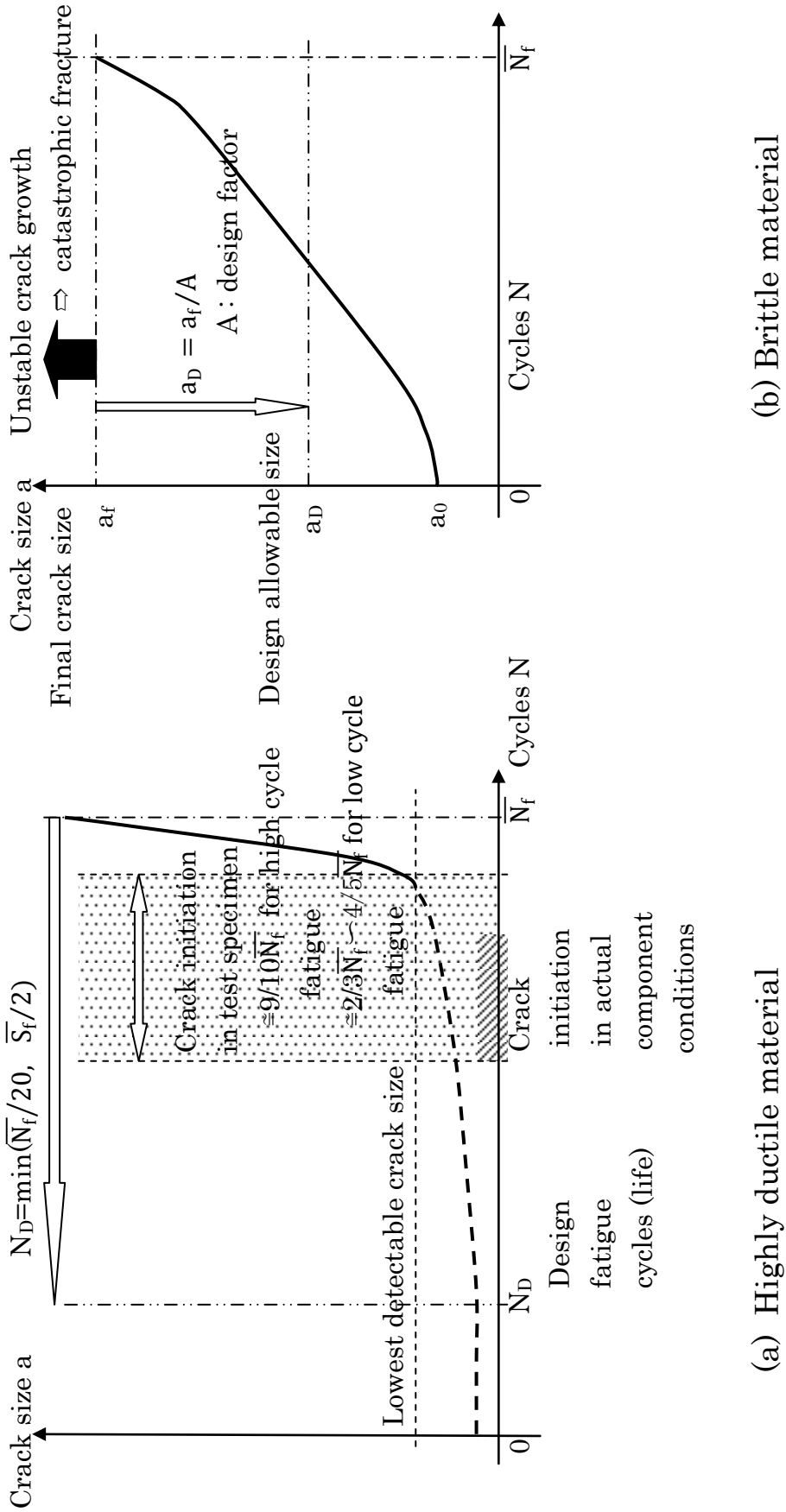


Fig. 4.8 Schematic illustration of fatigue cracking process for highly ductile materials and for brittle materials

5. あとがき及び今後の展開について

本レポートにおいて繰り返し述べてきたが、これまでのプラント機器の構造健全性確保の考え方、ひいては構造規格は、材料特性が使用中に大きくは変わらないことを前提に構築されてきた。必然性がある前提ではあるが、21世紀の国際競争社会を考えると、このような条件が手枷足枷となって今後の技術革新の妨げになることを危惧しているのは著者だけではなかろう。現実にも目を向けても、トカマク型核融合実験施設 ITER をはじめいくつかのプラント機器では、材料特性が使用中に大きく変わることが予想される、あるいはそうなることを許容しなければならない材料を使用せざるを得ないという現実がある。さらには、これまでは延性に富んだ金属材料があらゆる産業分野で使われてきたが、今後は、高強度や高熱伝導率などを追及する結果、ファインセラミックスなどの非金属も载荷能力を求められる構造材として、すなわち、強度部材として使用していかなければならない。金属材料自体についても、高強度化を図ると延性が低下する場合は往々にして見かけられる。

しかしながら、これらの材料を使用する上で構造健全性をどのように確保しようとしてきたかという点、高延性材機器に適用している構造健全性確保の考え方を準用している場合が往々にしてある。それでよいのであろうか。材料特性を適切に考慮した合理性のある考え方に立脚する必要があるのではないだろうか。非金属の場合で言えば、多種多様な非金属を強度部材として使用しようとするとき、早晚立ち行かなくなることを危惧する。しかし、後戻りはすべきではない。さらなる問題として、構造健全性確保の考え方を材料ごとに考えていてよいのか、ということがある。「体系化」が重要と考える。このようなことを考えざるを得ない典型的な例が、トカマク型核融合施設のプラズマ対向機器やプラズマ加熱装置、プラズマ計測機器などである。

このような背景のもとに、延性に富んだ金属材料を用いた機器から脆性的な非金属部品まで、それらの構造健全性確保を体系的に図るためにはどのように考えればよいのか、体系的な考え方とはどのようなものであるのか、ということについて検討を開始した。とりわけ、これまで検討例をほとんど見いだせない中間延性的な材料を用いた機器の構造健全性確保の考え方、あるいは使用中に大きく特性変化して延性が中間的なレベルまで低下する場合の構造健全性確保の考え方について、これまでに既に関連されている高延性材機器、脆性材部品に対する考え方を参考にしながら、体系化の観点を考慮しつつ考察した。これは、中間延性材機器に適用する構造健全性確保の考え方は、開発されていないだけでなく、高延性材機器、脆性材部品、各々の考え方に両側から挟みこまれており、一貫した体系的な思考が重要だからである。

本レポートに述べた検討から、体系化に重点を置いた中間延性材機器にも適用できる構造健全性確保の考え方として、次のことなどを提案した。なお、以下のことは、主要点の

み記述している。

- (1) 構造健全性確保の基本思想として、設計を含めた建設段階、並びに、使用段階（運転段階あるいは供用段階）を通して、安全性や経済性の確保など要求される機能を達成し、維持するために必要な品質水準を確保する。詳細は第 4.3 節に述べた。
- (2) 設計工程において必要な品質水準を確保し、構造健全性を確保することの基本的な概念は、限界力学パラメータの設計代表値（例えば、破壊強度データの統計的な最小値として定義する設計最小値） $L_{\min}$ 、内部変数パラメータの設計代表値 S^* に対してそれぞれ設計裕度 β_L 、 α_S を考慮して、下式を満足することとする。

$$\frac{S^*}{\alpha_S} \leq \frac{L_{\min}}{\beta_L} \quad (5.1)$$

この式自体はこれまで確率論的な設計手法として提案されているものと変わらない。著者の提案は、限界力学パラメータが、「制御できる最大のパラメータ」としていることである。これが一貫性のある、体系化を考える上で重要である。

なお、上式のように分離できるほどに統計的な検討ができず、破壊事故の統計的な整理しかできない経験ベースの場合には、設計裕度を DF として次式を満足することとするのが望ましい。

$$S^* \leq \frac{L_{\min}}{DF} \quad (5.2)$$

- (3) 延性破壊から脆性破壊を体系的に取り扱うため、破壊の形態を、Fig.4.1 に示すように、塑性変形誘起型の破壊と存在する欠陥が誘起する破壊として改めて分類することを提案した。
- (4) 想定する破損モードについて、Fig.4.7 にまとめた体系的な分類を提案した。
- (5) 塑性変形誘起型の破壊（いわゆる延性破壊）を防止する考え方について、特に曲げモーメント負荷時の変形と破壊を考察し、延性が低下した場合にも適用できる体系的な考え方を提案した。制限式としては、下式。

$$\frac{F}{A_F} + \frac{M}{A_M} \leq 1 \quad (5.3)$$

ここで、 A_F は、引張荷重 F に対する抵抗（限界強さとして塑性不安定を生ずる応力） $R(\sigma = \sigma_{us})$ から求まる許容荷重。 α_F は設計裕度。 A_M は、曲げモーメント M に対する抵抗（限界強さとしては、表皮応力が破壊強さ σ_f ） $R(\sigma = \sigma_f)$ から求まる許容荷重。 α_M は設計裕度。

なお、構造不連続部において、延性が 20% レベル（要検証）を下回る場合には正の局所主ひずみ ε^* は、以下を満足すること。

$$\varepsilon^* \leq \varepsilon_f / 2 \quad (5.4)$$

ここで、 ε_f は延性を表す。2 は設計裕度である。

- (6) ラチェット制限などや設計裕度（安全裕度）などの考え方についても体系化の観点から

提案した。

(7) 材料受入検査などについても微小欠陥の検査の考え方などについて提案した。

淡々と提案したが、これらのことを具体化し、構造規格として完成させていくのは相当に大変である。とりわけ、構造規格は、設計裕度の合理化の歴史をみればわかるように、経験至上的な工学技術の典型である。構造規格が人間と機械とのインターフェースであることを考えれば致し方ないところではあるが、しかし、その一方で経験を打破する技術革新を行えたところに未来がある。

今回の提案は、實川資朗氏はじめ何人かの友人の協力を支えに、また、これまで高温ガス炉や核融合施設機器の構造規格開発における故朝田泰英先生の厳しくも温かいご指導のもと、著者一人の技術的能力をはるかに超えることに無謀にも挑戦し、試行錯誤の果てにやっと一合目まで到達したと思ってまとめたものである。体系的な構造健全性確保の考え方としてどういう方向づけがあるかという試案である。

今後、これをたたき台にして、どのような課題が立ちはだかっているか検討し、どうやって解決することができるか、どうやって経験という壁を打破できるか、熟考したうえで研究開発の方針を打ち立て、着実に進展させることが望まれる。課題については、本レポートの中でも折にふれて言及したが、体系的な検討は、別のレポートに譲る意図から、行わなかった。研究開発の過程では、当然ながら、見直しもあるだろうし、大幅な路線変更もありうるであろう。それを躊躇してはいけない。

最後に、これまで規格開発に従事してきて、「規格とは、人間と自然との約束事」と、常々感じている。人間と人間との約束事ではなく。自然との約束事として自然が認めるような規格であれば、事故などとして人間が痛い思いをする理由がない。人間が自然を騙そうとするような規格であれば、あるいは、適切な規格であっても自然を騙そうとする人間がものづくりを行えば（規格に従った振りをして？）、早晚、自然から手痛いしっぺ返しがくる。自然に謙虚に接して合理的な規格を開発し、倫理性に富む謙虚な人間が自然と会話したいものである。

謝 辞

やっと卵から孵化させたばかりであるが、ここに至るまで構造規格の考え方を厳しくも激励しつつ教授いただいた故朝田泰英東大名誉教授、並びに、米国 Landers&Assoc. の D. F. Landers 氏に深く感謝いたします。また、高照射損傷材の材料特性をはじめ金属材料の特性について金属学の立場から教示いただいた實川資朗 耐照射性原子力材料開発グループリーダーに深甚なる感謝の意を表します。そして、このレポートについて査読頂いた加治芳行 原子力材料設計評価研究グループリーダーに感謝いたします。

参考文献

第 1 章

- [1-1] 例えば、2004 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III Rules for Construction of Nuclear Facility Components, the American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2004.
- [1-2] J. H. Gross, “PVRC Interpretive Report of Pressure Vessel Research Section 2—Materials Considerations”, Welding Research Council Bulletin 101(Nov. 1964), p.2.
- [1-3] T. Taguchi et al., “Post irradiation plastic properties of F82H derived from the instrumented tensile tests”, J. Nuclear Materials, 335(2004), pp.457-461.
- [1-4] A. R. Davies et al., “Tensile and fatigue strength of free-standing CVD diamond”, Diamond and Related Materials, 14(2005), pp.6-10.
- [1-5] 黒鉛構造物については、大洗研究所高温工学試験研究炉設計室、他、「高温工学試験研究炉の黒鉛構造設計方針」、JAERI-M 89-006（1989 年 2 月）。
- [1-6] “2004 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII Rules for Construction of Pressure Vessels, Division 3 Alternative Rules for Construction of High Pressure Vessels” 2004 Edition, ASME, July 1, 2004.

第 2 章

- [2-1] W. Cross, “The Code, an authorized history of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code”, ASME, 1990.
- [2-2] 北川浩、「塑性ひずみ局所化現象の解析 —最近の動向と問題点—」、日本機械学会論文集（A 編）、48 巻 427 号（昭和 57 年 3 月）、p.250-257.
- [2-3] B. Dodd and Y. Bai, “Ductile Fracture and Ductility with Application to Metalworking”, Academic Press, 1987, p.152.
- [2-4] E. Uptis and K. Mokhtarian, “Evaluation of design margins for Section VIII, Div. 1&2 of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Report No.1: Evaluation of Design Margins for ASME Code Section VIII, Division 1, Report No.2: Evaluation of Design Margins for ASME Code Section VIII, Divisions 1 and 2-Phase 2 studies”, Welding Research Council Bulletin 435(Sept. 1998), p.42.
- [2-5] 大路清嗣編、「総合材料強度学講座 5 破壊強度学」、オーム社、昭和 60 年 8 月、p.138.
- [2-6] 宮本博訳、「構造材料の強度と破壊②」、培風館、昭和 45 年 11 月、p.14.
- [2-7] “2004 ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII Rules for Construction of Pressure Vessels”, 2004 Edition, ASME, July 1, 2004.
- [2-8] K. R. Rao (editor), “Companion Guide to the ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Volumes 1&2”, ASME, 2002.
- [2-9] J.C.Gerdein, ” Limit analysis and plasticity", in "Pressure Vessels and Piping: Design Technology -1982- A decade of Progress", edited by S.Y.Zamrik and D.Dietrich, ASME,

1982, p.132.

[2-10] 文献[2-1], p.51

[2-11] 文献[2-8], Vol.1, p.195.

[2-12] T. Nakamura, I. Saito and Y. Asada, “Guideline on Environmental Fatigue Evaluation for LWR Components”, ASME PVP-vol.453, PVP2003-1780, 2003.

第 3 章

[3-1] ASME B16.34-1996, “Valves-flanged, threaded, and welding end”, ASME, 1994, p.3.

[3-2] 佐々、古賀、栗田、「セラミックスの構造設計」、石川島播磨技報、第 20 巻 第 5 号（昭和 55 年 9 月）、p.2。

[3-3] 文献[3-2]、p.1-6。

[3-4] Y. Asada, K. Miya and K. Hada(now, K. Suzuki), “Code of a Tokamak Fusion Energy Facility ITER”, ICON-22673, Proc. Of 10th Int. Conf. on Nuclear Engineering, April 14-18, 2002, Arlington, Virginia, USA.

[3-5] 小松、他 4 名共訳、「セラミックス材料科学入門 応用編」、内田老鶴圃、1989 年 7 月。

[3-6] D. S. Dugdale, Welding J., 31, 450(1952).

[3-7] 日本工業規格 JIS R 1625-1996「ファインセラミックスの強さデータのワイブル統計解析法」、平成 8 年 7 月制定。

[3-8] 宮本博訳、「構造材料の強度と破壊 2」、培風館、昭和 45 年 11 月、p.247。

[3-9] 強化プラスチック技術協会、「FRP 設計便覧」、p.235.

[3-10] 文献[3-9]、p.235。

[3-11] T. Iyoku et al., "Graphite core structures and their structural design criteria in the HTTR", Nuclear Engineering and Design, 132(1991), p.23-30.

あるいは、石原正博、他 3 名、「原子炉用黒鉛構造部材の受入れ検査」、炭素、2001(No.196), p.39-48.

[3-12] 石原正博、他 3 名、「原子炉用黒鉛構造部材の受入れ検査」、炭素、2001(No.196), p.43.

[3-13] 鈴木章彦、「ファインセラミックス部品の設計基準案」、配管技術、1989 年 1 月号、p.78-89.

[3-14] 日本工業規格「ガラス繊維強化プラスチック製耐食貯槽」JIS K 7012-1999、日本規格協会、平成 12 年 3 月。

[3-15] 社団法人 強化プラスチック技術協会「FRP 設計便覧」、1979.

[3-16] 日本工業規格 JIS R 1607-1995「ファインセラミックスの破壊じん（靱）性試験方法」、平成 7 年 4 月制定。

[3-17] American Petroleum Institute, API Recommended Practice 579 “Fitness-For-Service”, First edition, January 2000, p.1-1.

[3-18] 日本非破壊検査協会、NDIS 2420「パルス反射法による高周波超音波探傷試験通則」、日本非破壊検査協会では、平成 11 年 3 月。

[3-19] 水田安俊、恩田勝弘、「セラミックス部品・材料の検査」、非破壊検査、第 51 巻 7 号（平成 14 年 7 月）、p.386-391.

第 4 章

- [4-1] (編) 日本金属学会強度委員会 (委員長: 横堀武夫、他委員 7 名、「金属材料の強度と破壊」、丸善、昭和 53 年、p.164.
- [4-2] B. Dodd and Y. Bai, “Ductile Fracture and Ductility with Application to Metalworking”, Academic Press, 1987, p.3.
- [4-3] 横堀武夫、「材料強度学 第 2 版」、岩波全書 (岩波書店)、1974、p.131
- [4-4] “2004 ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III Rules for Construction of Nuclear Facility Components, Division 1-Subsection NB Class 1 Components, NB-3228-4 Shakedown Analysis”, the American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2004.
- [4-5] M. W. Schwartz, “Recommendations for Ductile and Brittle Failure Design Criteria for Ductile Cast Iron Spent-Fuel-Shipping Containers”, NUREG/CR-3760, April 1984.
- [4-6] H. W. Swift, “Plastic Instability under Plane Stress”, J. of Mechanics and Physics of Solids, Vol.1(1952), p.1.
- [4-7] 實川、私信、2006 年 5 月。
- [4-8] S. Jitsukawa, M. Grossbeck and A. Hishinuma, “Stress-strain relations of HFIR-irradiated austenitic stainless steels”, J. Nuclear Materials, 179-181(1991), p.563-567.
- [4-9] 文献[1-2], p.6.
- [4-10] S. Jitsukawa, I. Ioka and A. Hishinuma, “Post-irradiation mechanical properties of austenitic alloys at temperatures below 703K”, J. Nuclear Materials, 271&272(1999), p.167-172.
- [4-11] 八木、船木、熊本、「厚鋼板の塑性曲げ (第 1 報)」、日本造船学会論文集 第 135 号 (1974 年)、p.293-305。
- [4-12] N. Triantafyllidis, “Bifurcation phenomena in pure bending”, J. Mech. Phy. Solids, Vol.28(1980), pp.221-245.
- [4-13] ASME, “Criteria of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code for design by analysis in Sections III and VIII, Division 2”, 1969, p.6.
- [4-14] L. F. Kooistra and M. M. Lemcoe, “Low cycle fatigue research on full-size pressure Vessels”, Welding Res. Suppl., August 1962, p.368-s.
- [4-15] 文献[2-8], Vol. 2, p.173.
- [4-16] 鈴木、私信、1979 年 2 月。
- [4-17] 鈴木、「定常機械荷重と繰返し熱荷重を受ける構造物の挙動について (降伏応力の温度依存性の効果)」、日本機械学会論文集 第 45 巻第 399 号 A 編 (昭和 54 年 11 月)、p.1373-1381。
- [4-18] 羽田 (現姓: 鈴木)、「時間とともに硬化する構造物の熱応力ラチェット解析」、日本機械学会論文集 第 65 巻第 636 号 A 編 (平成 11 年 8 月)、p.1756-1763。
- [4-19] K. Hada(now, K. Suzuki) et al., “Thermal Transient Analysis for Structural Integrity of High Temperature Components in HTTR”, ICONE-1 d-30, The first JSME/ASME Joint Int. Conf. on Nuclear Engineering, Nov. 4-7, 1991, Tokyo, Japan.

- [4-20] International Organization for Standardization, “ISO 2394 General principles on reliability for structures, Second edition”,, 1998.

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度（質量密度）	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積（比体積）	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
（物質量の）濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	（数の）	1

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m・kg・s ⁻²
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
工率，放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg・s ⁻³
電荷，電気量	クーロン	C		s・A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度 ^(d)	セルシウス度	°C		K
光度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ² ・m ⁻² ・cd=m ² ・cd
（放射性核種の）放射能	ベクレル	Bq		s ⁻¹
吸収線量，質量エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量，組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときいくつかの用例は表 4 に示されている。
- (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表 4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ⁻¹ ・kg・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度，放射照度	ラジアン毎平方メートル	rad/s ²	m ² ・m ⁻² ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量，エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg・s ⁻³
質量熱容量（比熱容量），質量エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー（比エネルギー）	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎メートル毎ケルビン	J/(m・K)	m・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ²
モルエネルギー，モルエントロピー，モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
照射線量（X線及びγ線）	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
吸収線量	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s・A
放射強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =kg ⁻¹ ・s ⁻³

表 6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表 7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で SI 単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733 (49) × 10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402 (10) × 10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691 (30) × 10 ¹¹ m

表 8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600) m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1 Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁻⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=1000(4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位		1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ		1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

