

JAERI-M
91-056

高温工学試験研究炉の高温で使用される
ボルト等及び拘束バンドの構造の規格の
検討

1991年3月

元木 保男・羽田 一彦・西口 磯春^{*}・馬場 治

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1991

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日立高速印刷株式会社

高温工学試験研究炉の高温で使用されるボルト等
及び拘束バンドの構造の規格の検討

日本原子力研究所大洗研究所高温工学試験研究炉開発部
元木 保男・羽田 一彦・西口 磯春*・馬場 治

(1991年2月27日受理)

高温工学試験研究炉の第1種機器のボルト等と、炉心支持構造物のボルト等及び拘束バンドの高温構造設計に適用するために構造の規格を作成した。

この構造の規格は、通商産業省告示第501号、ASME B&PV Code Sec. III Div. 1, ASME B&PV Code Case N-47, N-253-4 及び「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針」を参考にしている。

本報告書においては、使用材料の材料特性を検討するとともに、構造の規格を作成するに当たっての基本的な考え方を明らかにしている。規格の作成に当たり、使用条件の特徴である以下の項目を考慮している。

- ・ 使用材料は、ボルト鋼のJIS SNB16とオーステナイト系ステンレス鋼のJIS SUS 316である。
- ・ 高温工学試験研究炉におけるヘリウム環境及び中性子照射効果は、これ等の材料強度にほとんど影響を与えない。
- ・ ボルト等及び拘束バンドは、通常運転時には非クリープ温度域で使用される。

Developments of High-Temperature Structural Design Rules
for the HTTR Class 1 Boltings and Core-Restraint-Bands

Yasuo MOTOKI, Kazuhiko HADA, Isoharu NISHIGUCHI^{*} and Osamu BABA

Department of HTTR Project
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received February 27, 1991)

High-Temperature Structural Design Rules are developed for the HTTR (High Temperature Engineering Test Reactor) boltings of class 1 components and core supports structures, and Core-Restraint-Bands (core restraint mechanism in used self-tightening system). The rules are established on the basis of LWR regulatoly guide MITI regulation No. 501 in Japan, ASME B&PV Code Sec. III Div.1, ASME B&PV Code Case N-47, N-253-4 and the Elevated Temperature Structural Design Guide for Class 1 Components of the prototype Fast Breeder Reactor "Monju" (FBR Code).

This report describes investigation of the material property and fundamental considerations in developing the design rules. The following features in loading conditions are incorporated in developing the rules.

- The structural materials are class 1 bolting steel (JIS SNB16) and austenitic stainless steel (JIS SUS316).
- HTTR-helium environment and irradiation effects on the these materials are insignificant.
- These components are in service below temperatures that creep effects are insignificant at normal loading condition.

Keywords : HTGR, HTTR, Design Rules, ASME N-47, Class 1 boltings, Creep, SNB16, Structural Design, Core Support Structure

* Kanagawa Institute of Technology

目 次

1.はじめに	1
2.ボルト等及び拘束バンドの概要検討	2
2.1 ボルト等及び拘束バンドの主要な使用部位と使用条件	2
2.2 使用材料の選定及び材料特性の概略検討	2
2.3 「告示」(通商産業省告示第501号)規定の適用可能範囲の検討	4
3.構造の規格の検討	17
3.1 規格の策定方針	17
3.2 高温で使用される第1種機器のボルト等の構造の規格の検討	18
3.3 高温で使用される炉心支持構造物のボルト等の構造の規格の検討	20
3.4 高温で使用される炉心支持構造物の拘束バンドの構造の規格の検討	21
4.高温で使用されるボルト等及び拘束バンドの構造の規格	22
4.1 高温で使用される高温工学試験研究炉第1種容器のボルト等の構造の規格	22
4.2 高温で使用される高温工学試験研究炉炉心支持構造物のボルト等の構造の規格	27
4.3 高温で使用される高温工学試験研究炉炉心支持構造物の拘束バンドの構造の規格	32
5.あとがき	37
謝 辞	38
参考文献	39
付録 材料強度基準等	40

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of the HTTR Class 1 Boltings and Core-Restraint-Bands	2
2.1 Outline of the HTTR structural design and loading conditions	2
2.2 Outline of the material property and selection	2
2.3 Study of applicable limit from MITI-501 regulation	4
3. Considerations for Developing Design Rules	17
3.1 Principles for development	17
3.2 Study of High-Temperature Class 1 Boltings design rules	18
3.3 Study of High-Temperature Core Support Boltings design rules	20
3.4 Study of High-Temperature Core-Restraint-Bands design rules	21
4. Design Rules for the HTTR Class 1 Boltings, Core Support Boltings and Core-Restraint-Bands for elevated-temperature	22
4.1 Design rules for HTTR Class 1 Boltings	22
4.2 Design rules for HTTR Core Support Boltings	27
4.3 Design rules for HTTR Core-Restraint-Bands	32
5. Concluding remarks	37
Acknowledgements	38
References	39
Appendix Design Allowable Limits	40

1.はじめに

日本原子力研究所で建設を進めている高温工学試験研究炉（High Temperature Engineering Test Reactor）は、黒鉛を減速材とし、ヘリウムガスを冷却材とした熱出力30Mwt、原子炉入口／出口ガス温度がそれぞれ約395°C／約950°Cの高温ガス炉である。

高温工学試験研究炉では、原子炉圧力容器のフランジ、1次ヘリウム循環機のケーシング等の締結部にボルト構造を採用すると共に、炉心支持構造物においては、炉心の周囲に配置された黒鉛製の固定反射体を樽状に緊縛する炉心拘束機構を用いる。炉心拘束機構の主要構成要素である拘束バンドは、ボルト等と同様に金属の弾性力をを利用して構造物を緊縛する機構である。

これ等のボルト等及び拘束バンドの最高使用温度は、軽水炉を対象とした「発電用原子力施設に関する構造等の技術基準」¹⁾（昭和55年通商産業省告示第501号、以下、「告示」という）の適用温度範囲を超えている。更に、軽水炉では拘束バンド構造を使用していないため、「告示」では拘束バンドに対する規定を定めていない。このため、高温ガス炉用の構造等の技術基準として、高温（「告示」の適用温度範囲を超える温度）域で使用するボルト等及び拘束バンドについての具体的な規定を新たに策定する必要があった。

策定に当たっては、高温工学試験研究炉での使用条件（荷重、使用温度等）を検討し、これらの条件を考慮した材料選定と材料R&D^{2), 3), 4), 5), 6)}を実施するとともに、「告示」のボルト等の規定、一般化工機⁷⁾のボルト規定及びASME B&PV Code Sec III Div. 1⁸⁾, Code Case N-47⁹⁾, Code Case N-253-4¹⁰⁾の各々のボルト等の規定並びに「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針」¹¹⁾を調査し、参考にした。

本報告書は、高温域で使用するボルト等及び拘束バンドについての具体的な規定を策定するに当たっての基本的な考えを述べるとともに、高温で使用される第1種機器のボルト等の構造の規格及び高温で使用される炉心支持構造物の拘束バンドの構造の規格を示す。なお、炉心支持構造物のボルト等は、高温工学試験研究炉での使用は想定していないが、このボルト等が使用される場合を考慮して、このボルト等についても構造の規格を検討した。

この高温で使用されるボルト等及び拘束バンドの規定の策定方法については、昭和59年度～61年度に財団法人原子力安全研究協会（以下、「原安協」と云う）に委託し、同協会内に「高温ガス炉安全基準調査専門委員会・高温構造設計分科会」（主査：矢川元基 東京大学教授）を設け、検討が加えられた^{12), 13)}。

高温工学試験研究炉のボルト等及び拘束バンドの設計は、本構造の規格に基づいて実施しており、また、高温工学試験研究炉の設計及び工事の方法の認可申請にも本構造の規格を用いる予定である。

2. ボルト等及び拘束バンドの概要検討

構造の規格は機器の構造、使用条件、使用材料特性等と密接に関連するので、対象とする機器の概略構造、設計条件及び使用条件、対象材料の強度特性等を概略検討するとともに、策定すべき規格の適用範囲を明確にするために、「告示」規定の当該材料に対する適用可能範囲を検討した。

2.1 ボルト等及び拘束バンドの主要な使用部位と使用条件

高温工学試験研究炉の原子炉圧力容器は上部及び底部が半球状のたて置円筒型で、圧力容器ふたは、フランジで圧力容器胴にボルト締めする構造である。図1に原子炉圧力容器構造及びフランジのスタッドボルトを示す。

1次ヘリウム循環機は、1次冷却材の系外への漏えいを防止するため、駆動軸及び電動機をケーシング内に組み込んだ密閉型である。また、1次冷却材中の微粒子等が軸受けに混入するのを抑制するために、上部ケーシング内にフィルタを設けている。図2に1次ヘリウム循環機の構造とケーシングボルトを示す。

炉心拘束機構は固定反射体を緊縛する拘束バンドとバンド支え、並びに地震時の炉心荷重をバンド支え部のストッパー及び連結ピンから原子炉圧力容器に伝えるレストレイントリング、ラジアルキー等から構成される。図3は炉心支持構造物及び炉心拘束機構の配置を示す。拘束バンドのユニットは複数の同心円管と1本の中心棒からなり、これらは交互に等量の引張力と圧縮力を受ける様に組合せて、全体で引張バネ要素となる構造である。また、引張材と圧縮材に熱膨張係数の異なる材を組合わせることによって、拘束バンド両端の熱膨張係数を黒鉛材の係数に合わせることが出来る。このため、拘束バンドは黒鉛製の固定反射体の熱膨張に追従して緊縛力を維持出来る構造である。図4に拘束バンドの機能の概要説明図を、図5に拘束バンドユニットの構造説明図をそれぞれ示す。

表1に、上述した高温で使用される主要なボルト等及び拘束バンドの環境条件、荷重条件並びに使用温度条件を示す。使用温度については、想定される各運転状態における温度と最高使用温度をそれぞれに示した。

2.2 使用材料の選定及び材料特性の概略検討

(1) 使用材料の選定

使用材料の選定においては主として下記の事項に留意して検討した。

- 1) 高温強度（クリープ強度含む）が強く、使用実績の豊富な材料であること。
- 2) 環境効果（耐放射線性、耐ヘリウム効果）に優れていること。
- 3) 破壊靭性（耐熱時効特性含む）に優れていること。

4) 熱膨張係数の整合性が良いこと。

上記事項に留意しつつ、表1の荷重条件、使用温度条件等の検討から、ボルト等の使用材料は原子炉圧力容器、1次ヘリウム循環機のケーシング材（JIS SCMV4 NT (2·1/4Cr-1Mo鋼)）と熱膨張係数がほぼ等しく、「告示」で第1種機器耐圧パウンダリのテンションボルト材としての材料規定が有り、かつ、一般化工機の高温容器ボルト材としての実績が豊富な JIS SNB16 を選定した。

また、拘束バンド材については、バンドの引張材にはSNB16を、圧縮材には、このSNB16と組み合わせた時のバンドユニット両端の熱膨張係数が黒鉛材の係数に整合できる材料の中から、高温特性に優れ高速原型炉等の高温構造設計方針に材料規定の有る JIS SUS316 を用いることとした。

(2) 材料特性の概略検討

SUS316については高速原型炉等の高温構造設計方針に規定された材料なので、ここでは割愛し、SNB16の材料特性の検討概略を以下に示す。なお、材料強度基準等の策定についての検討は別報で詳細に報告する。

1) 高温強度特性について

イ) 高温引張強度特性

図6にSNB16材の引張強度特性を示す。極限引張強さ及び降伏応力強さは、取得温度データ^{2), 3), 4), 5), 6)}の550°Cまで、両者の強度比をほぼ一定に保ちながら、なだらかな低下を示す。また、破断伸び等も滑らかな変化を示しており、少なくとも550°Cまでは、金属組織的に極端な変化は生じていないと言える。

ロ) クリープ破断強度特性

図7にSNB16材のクリープ破断強度特性を示す。図中の矢印は未破断で中止した試験データを示す。なお、図中の点線は各温度データ群の中央を目視で結んだ線である。400°Cのデータ^{2), 3)}では、破断時間と応力との間に有意な時間依存の関係は認められない。450°Cのデータ^{2), 3), 4), 5), 6)}では、僅かに時間依存の関係が認められる。また、500°C~550°Cのデータ^{3), 4), 14)}では、かなり明確なクリープ効果が現れるこども示している。これ等のデータより、ほぼ450°C程度からクリープ効果が現れてくると判断できる。

ハ) 疲労強度特性

図8にSNB16材の疲労強度特性を示す。取得した大気中の350°C~500°Cまでの、連続三角波による繰り返し破断データ^{2), 3), 4)}を比較すると、僅かに温度の効果が認められるが、ほぼデータのバラツキの範囲に在ると判断できる。ただし、図7に示した500°Cのクリープ破断強度特性データからは、歪を保持した疲労試験、即ち、クリープと疲労の相互作用効果においては若干の寿命低下が予想される。

2) 環境効果について

イ) SNB16材の耐放射線性については、主要化学成分が Cr, Mo, V の低炭素合金鋼であり、「告示」においても耐放射線性が要求される第1種機器のボルト材として

規定されている材料である。更に、JEAC規定¹⁵⁾では、サーベイランスを必要とする低合金鋼の照射量は 10^{17} nvt以上とされているが、表1に示すように設計寿命における予想積算照射量は 10^{17} nvt以下となり照射損傷を考慮しなくても良いレベルである。しかしながら、材料強度に及ぼす影響も含めて確認のために照射試験を実施して、少なくとも～ 10^{19} nvtまでは材料強度上の問題のないことを確認している¹⁶⁾。

ロ) 耐ヘリウム効果としては、高温雰囲気における脱炭現象による強度低下の効果とヘリウムガス中の不純物、例えば、C, CO, H, O 等による侵炭、酸化、水素脆化が考えられるが、近似材料の文献¹⁷⁾によれば、表1の使用温度レベルでは金属表層の～数 μ mが影響される程度と推定できるので、上述した効果は無視できる。なお、金属表面の酸化等は疲労寿命に影響を与えると考えられるが、設計疲労強度は酸化が大である大気中の疲労試験データを用いることで安全側に設定できる。

3) 破壊靱性について

Cr-Mo系の低合金鋼は高温で長時間使用されると、熱時効効果によって、破壊靱性が低下することが知られている。しかしながら、近年のこの分野の研究進展により、P, Si等の不純物を低減することで破壊靱性の低下を抑制できるようになってきた。近似材料の文献¹⁸⁾でも報告されているように、不純物の制限指標であるJ-factorとしては～100以下、Xとしては～10以下を目標値としての制限は製造実績でも十分可能であり、表1の使用温度レベルでは、熱時効効果は無視できるレベルであることを確認している¹⁹⁾。

2.3 「告示」(通商産業省告示第501号)規定の適用可能範囲の検討

「告示」規定の概略構成は別表第1で使用材料を規定し、破壊靱性規定、非破壊検査規定並びに、応力制限の規定を材料の種類、機器の重要度(機器区分)毎に設けている。更に、原子炉圧力容器の様に重要な機器であって照射損傷のような経時劣化が想定される機器においては監視試験片の規定を設けている。高温工学試験研究炉のボルト等及び拘束バンドの構造等の規定を策定するに当たって、「告示」規定との整合性を考慮するために、「告示」規定の適用可能範囲を明確にしておく必要がある。

1) 「告示」規定の別表第1の適用について

イ) ボルト等

SNB16材を第1種機器のボルト等に使用することは別表第1の適用範囲である。ただし、炉心支持構造物のボルトに使用する場合には、規定の追加が必要である。

ロ) 拘束バンド

SNB16材を炉心支持構造物に使用する場合には、規定の追加が必要である。しかしながら、上述したように環境効果上の制限を新たに追加するものは無いので、SNB16材を炉心支持構造物に使用出来るように規定を追加するのは問題ない。

2) 「告示」規定の破壊靱性規定、非破壊検査規定の適用について

① ボルト等

SNB16材は別表第1の規定材であり、上述したように熱時効効果上の制限を新たに追加する必要もないで、そのまま適用できる。

② 拘束バンド

「告示」の炉心支持構造物の構造規定には拘束バンド構造は無い。「告示」規定の破壊靱性規定、非破壊検査規定は、ボルト等かその他の炉心支持構造物かによって規定内容が異なる。したがって、拘束バンドをボルトの一種と考えるかその他の炉心支持構造物とするかを検討する必要がある。以下に規定設定の基本的考え方を示す。

< 規定設定の基本的考え方 >

拘束バンドは、オーステナイト系ステンレス鋼のSUS316と、ボルト鋼のSNB16で構成している。オーステナイト系ステンレス鋼は、靱性が高いので「告示」でも破壊靱性試験は規定していない。拘束バンドのSNB16材は、図5に示した様に、主に引張応力が作用し、荷重も自己拘束型の2次荷重であり、ボルトと同様の応力-荷重形態で、生ずる応力も比較的単純である。「告示」のボルト等の規定の「解説」では、「ボルトにあっては、生ずる応力が比較的単純であることからその破壊靱性については衝撃試験のみでよいとした。」と解説している。更に、下記の参考事例に示すように、形状からの規定が難しい場合は、素材で判断している例もある。従って、素材が鍛造ボルト鋼である拘束バンドの SNB16材の規定は、ボルト材の規定に準拠するのが適当であると判断できる。

参考事例（発電用原子力設備に関する構造等の技術基準「質疑応答集」²⁰⁾から）

13-3 弁体の破壊靱性試験等の取扱い（第83条第3項）

質問 弁体は、破壊靱性試験等の規定の中で棒、板等何で扱うのか。

回答 弁体は種々の形状があり、形状からの規定は難しいので素材で判断する
ただし、成形鍛造で弁体を製作する場合は、鍛造品扱いとする。

14-1 強度部材を構成するボルト材（第86条）

質問 下図（ターンバックル）のように、ねじ切りのある支持構造物は、ねじ部も強度部材を構成しているが、ボルト等に含まれるか。また、この支持構造物を板を加工して作る場合、非破壊試験は「ボルト等」又は板のどちらで行うのか。

回答 ねじ切りがあり、そのねじ部が強度部材となるものは、原則としてボルト等に含む。図の例のターンバックルは、ボルト等のうちナットとして取り扱う。この場合、非破壊試験は、素材により判断するものとし質問の場合は「板」の規定を適用する。（以下、図は省略）

3) 応力制限の規定の適用について

「告示」規定の応力制限規定は、別表第2から別表第17までと、別図第1から別図第21までの許容応力値、適用圧力等を用いて、機器分類ごとに、各運転状態に応じた応力制限を設けている。更に、機器においてもボルト等とその他の構造部とで応力制限規定を変えている。別表第2から別表第10までに規定している許容応力は、各材料毎に、温度と応力値との組み合わせで表示している。別図は鋼種または材料強度で適用を規定している。

SNB16材の「告示」別表、別図において規定している応力の種類と適用温度範囲を表2に示す。なお、「告示」規定の炉心支持構造物では、ボルト等の応力制限は別表2を使用するので、SNB16材のボルト等を使用するならば別表2にSNB16材の許容応力値を追加規定しなければならない。

表2の別表第10(S_u)及び別図第1(設計疲れ線図)の適用温度範囲が別表第3(S_m)より低いのは、この温度が非クリープ領域の境界を示すと言うよりも、単に、軽水炉での使用する予定の温度域を示したと考えられる。「告示」の質疑応答集(昭和59年改訂版)からでも、別表第1の備考で使用温度が制限されている材料については、当該制限温度でしか使用してはならないが、制限されていない材料については、各別表の規定範囲を超えた場合の許容応力値は各別表の備考に規定されている方法により求めることができると解釈できる。

従って、策定すべき高温での規定と「告示」との整合性を考慮すると、十分非クリープ領域の温度であるが、別表第3の425°Cを「告示」規定の適用温度範囲と考え、別表第10(S_u)及び別図第1(設計疲れ線図)の許容値を、告示のそれぞれの規定に基づき425°Cまで定めて使用することは妥当であると考える。

表1 高温で使用されるボルト等及び拘束バンドの使用条件

項目	第1種機器ボルト		炉心支持構造物 拘束バンド
	原子炉 圧力容器	1次ヘリウム 循環機	炉心拘束機構
使用機器			
使用雰囲気 照射量(>1MeV)	大気中 $\leq 10^{16}$ nvt	大気中 —	ヘリウム中 $\leq 10^{17}$ nvt
最高使用圧力 又は機械的荷重	48kg/cm ² G	48kg/cm ² G	~6ton/バンド 1本
最高使用温度	440°C	430°C	450°C
ボトル束 トバ 部及 び部 温 度	運転状態 I	~340°C	~400°C
	運転状態 II	~340°C	~400°C
	運転状態 III	~340°C	~400°C
	運転状態 IV	~420°C	~550°C ^{*2)}

*1) 継続時間は運転員の対処時間として、10時間/事象を想定している。

*2) ~420°Cを超える温度の継続時間は~100時間程度と評価している。

表2 「告示」におけるSNB16の別表及び別図の適用温度範囲

「告示」別図表名	適用温度範囲	備考
別表第3(Sm)	$\leq 425^\circ\text{C}$	運転状態 I、 II、 IIIの応力評価に使用
別表第8(S)	$\leq 425^\circ\text{C}$	第1種ポンプ等の最高使用温度における 応力評価に使用
別表第9(Sy)	$\leq 425^\circ\text{C}$	$S_m = 1/3 S_y$ のため実質的には運転状態 I、 II、 IIIの応力評価に使用しているのと同じ
別表第10(Su)	$\leq 350^\circ\text{C}$	運転状態 IVの応力評価に使用
別図第1 (設計疲れ線図)	$\leq 375^\circ\text{C}$	運転状態 I、 IIの疲れ解析に使用

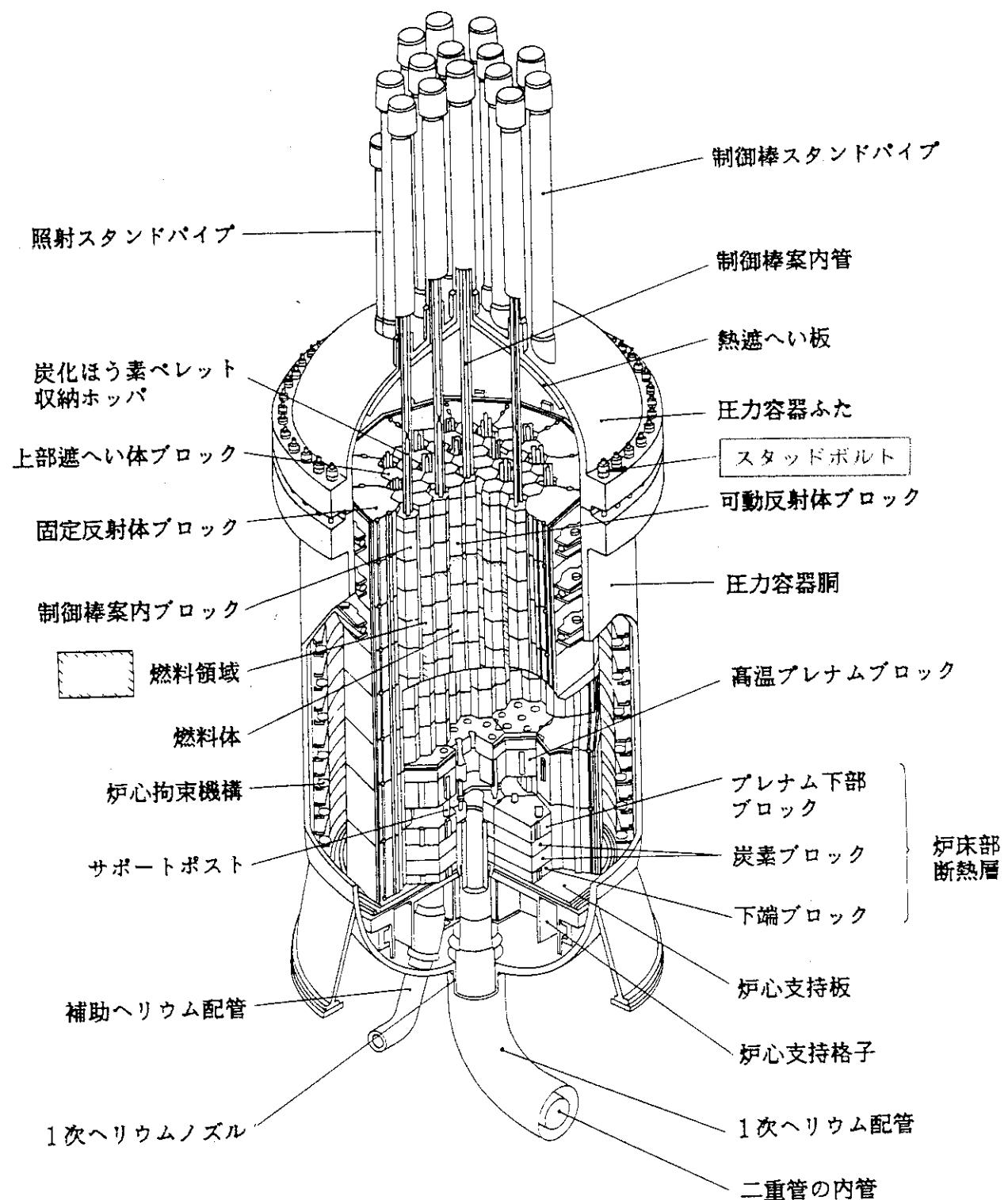


図 1 原子炉圧力容器のボルト配置図

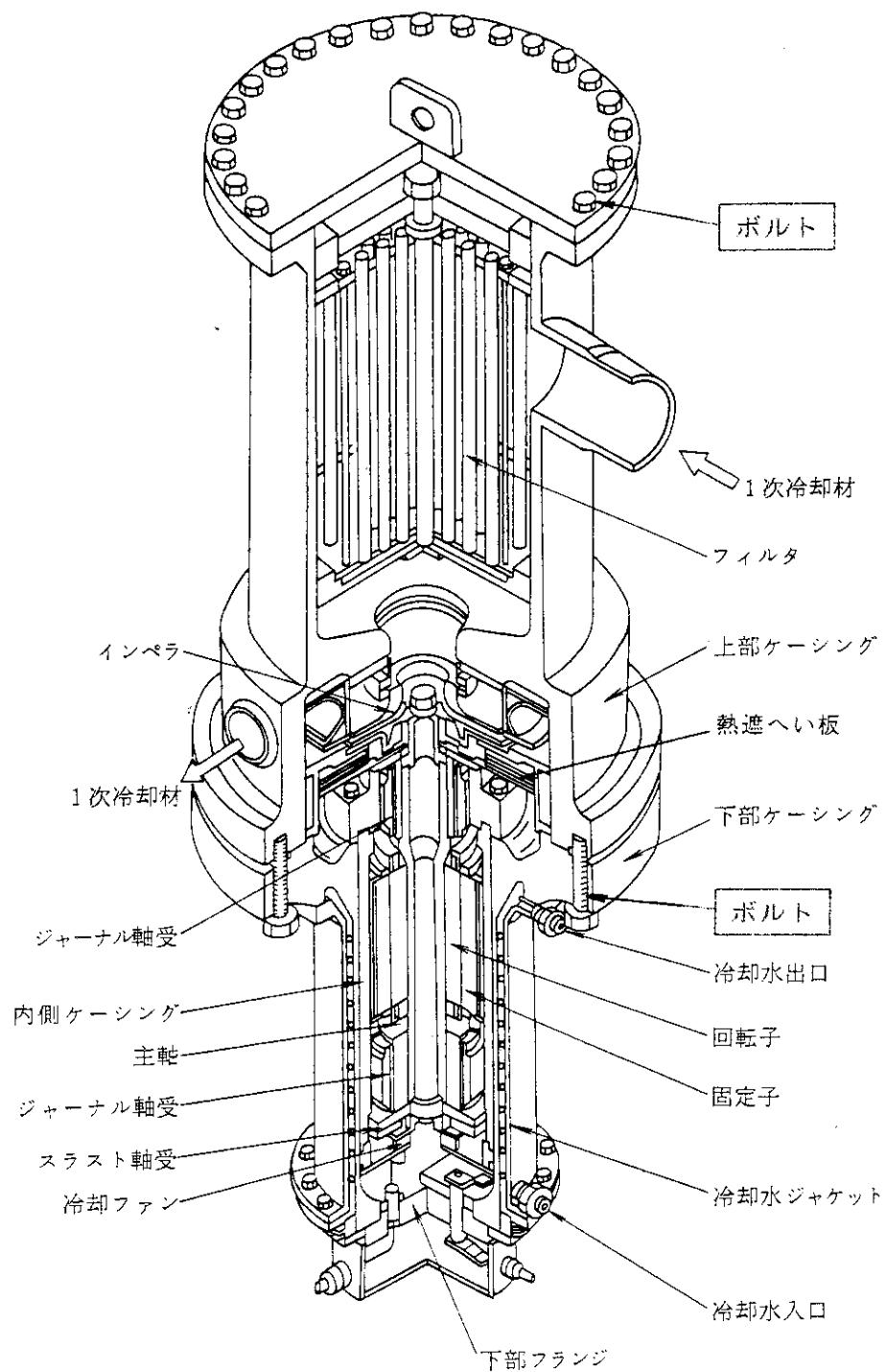


図 2 1次ヘリウム循環機のボルト配置図

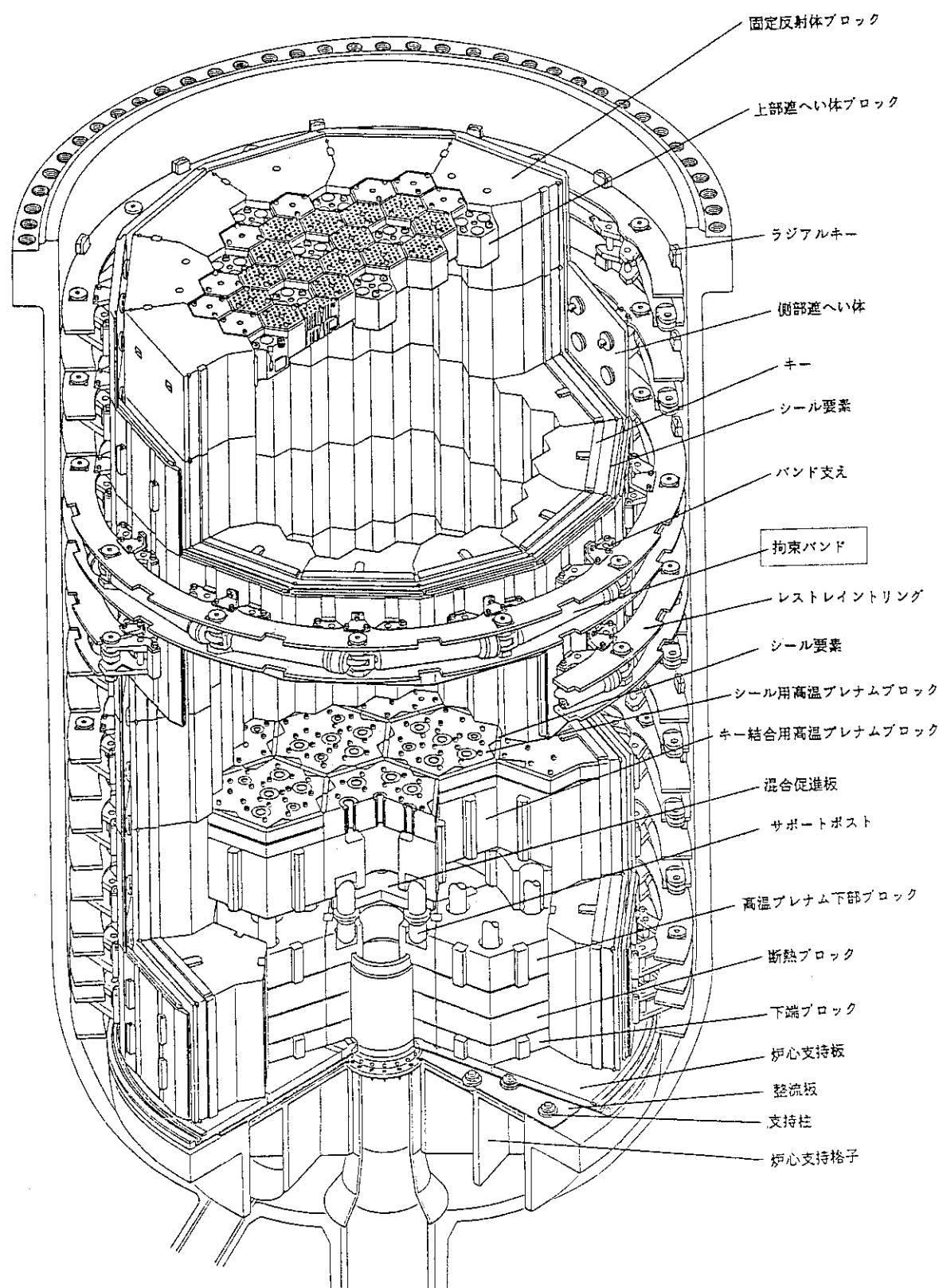
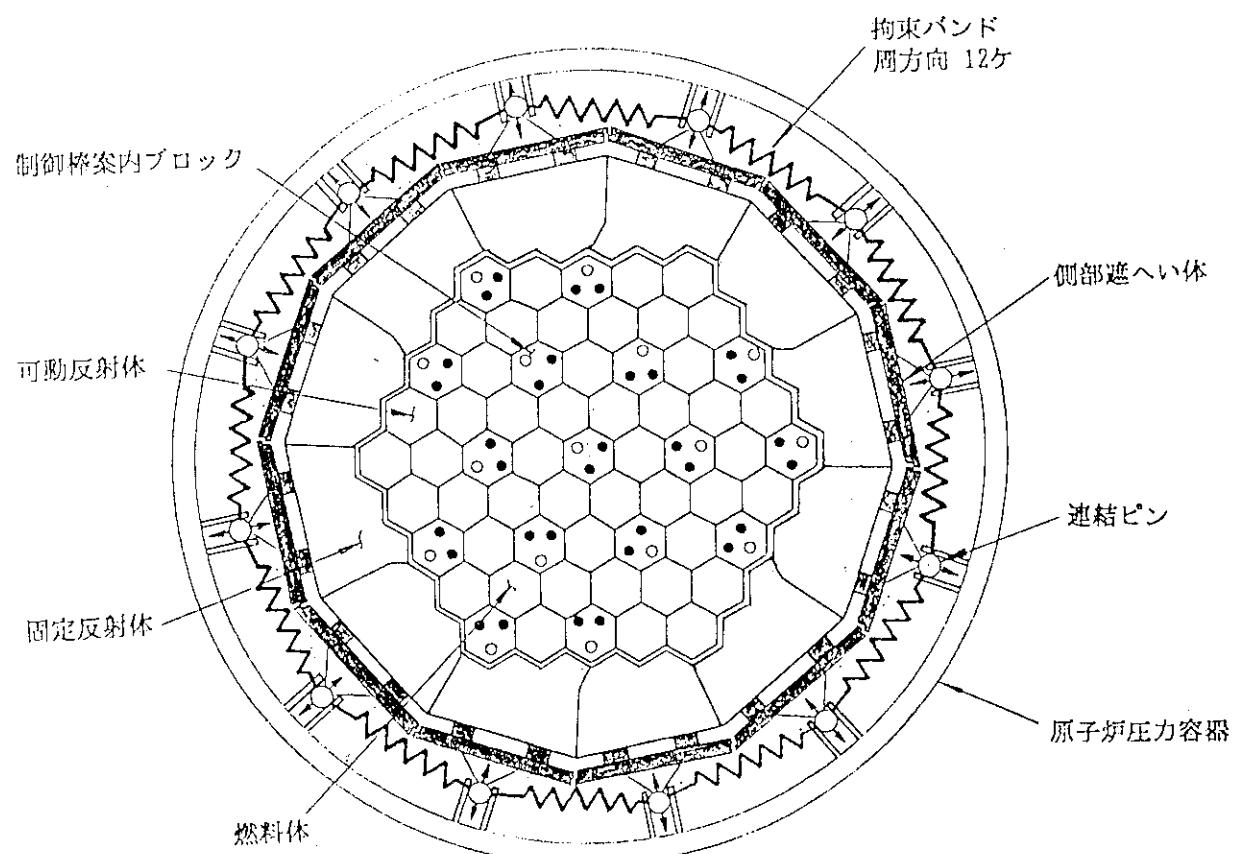


図 3 炉心支持構造物の拘束バンド配置図



※ 連結ピンの変位は半径方向のみ許される。

図 4-(1) 束縛バンドの機能説明図

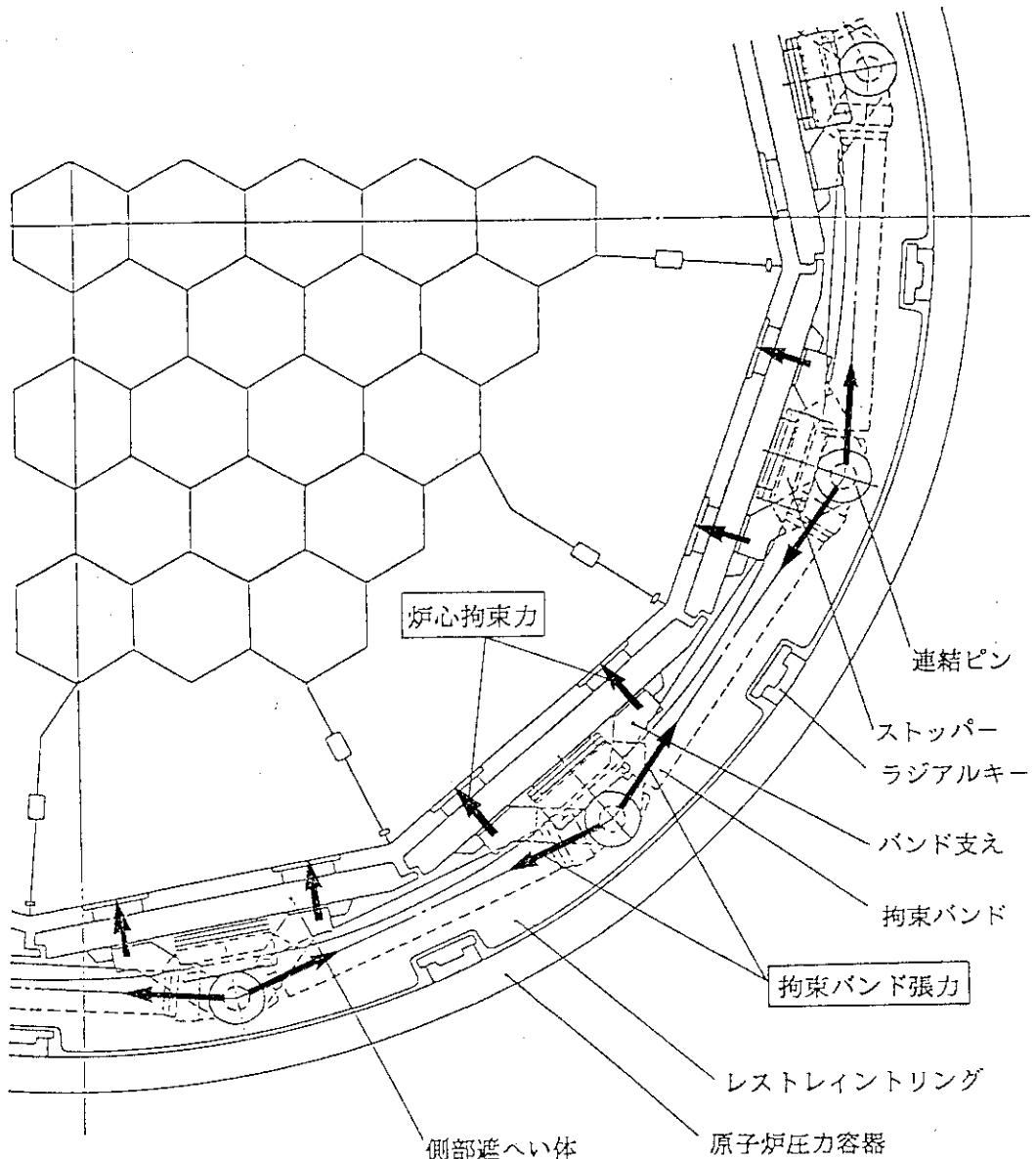


図 4-(2) 拘束バンドの機能説明図

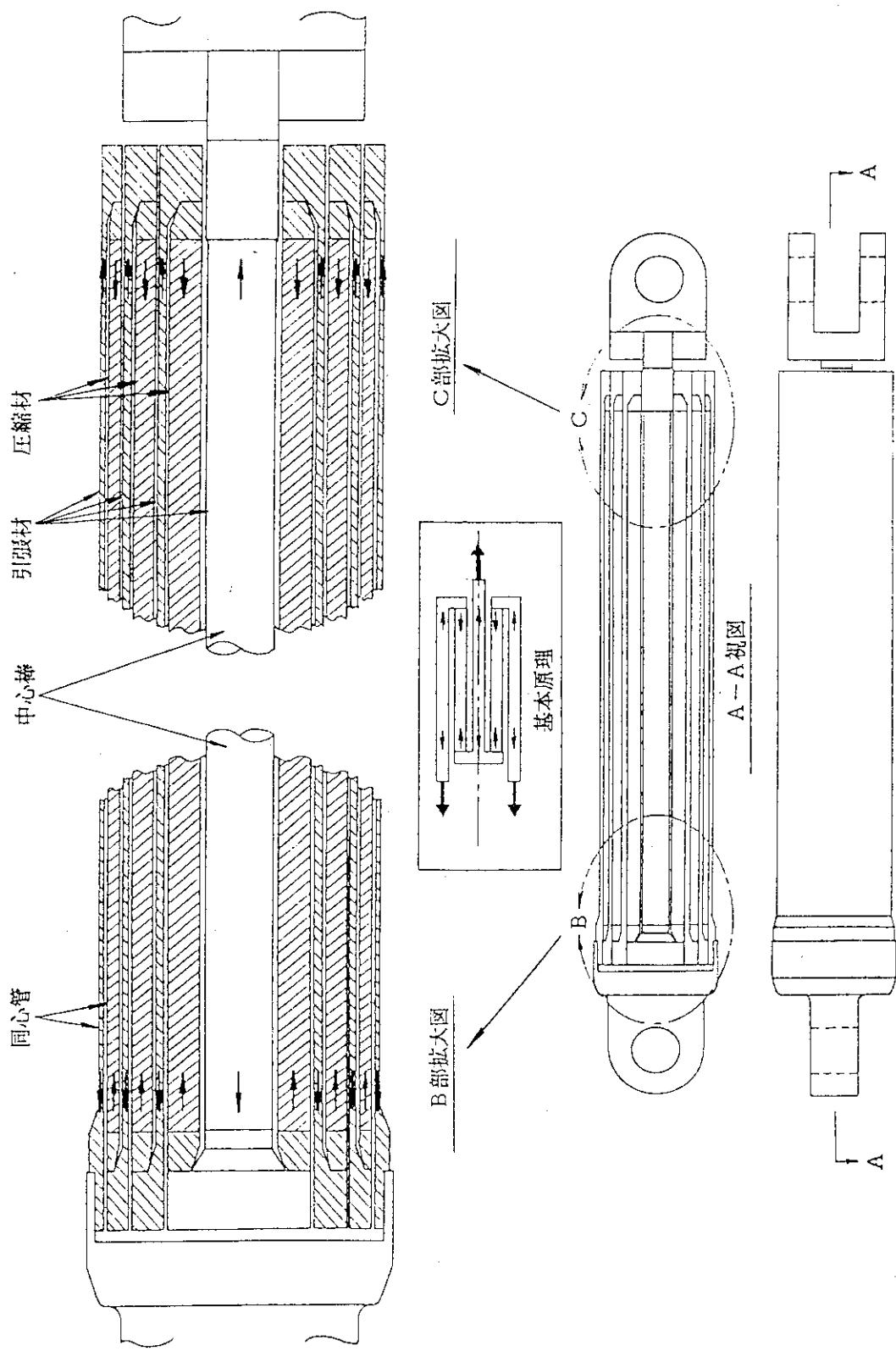
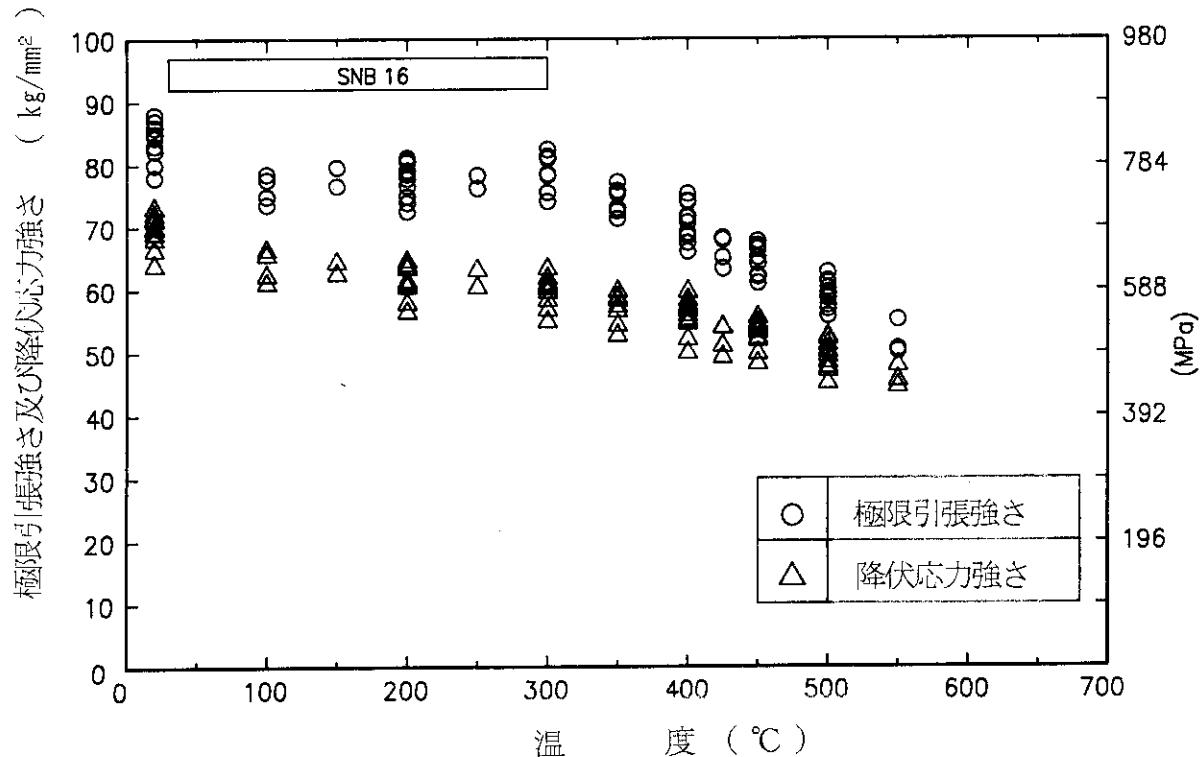
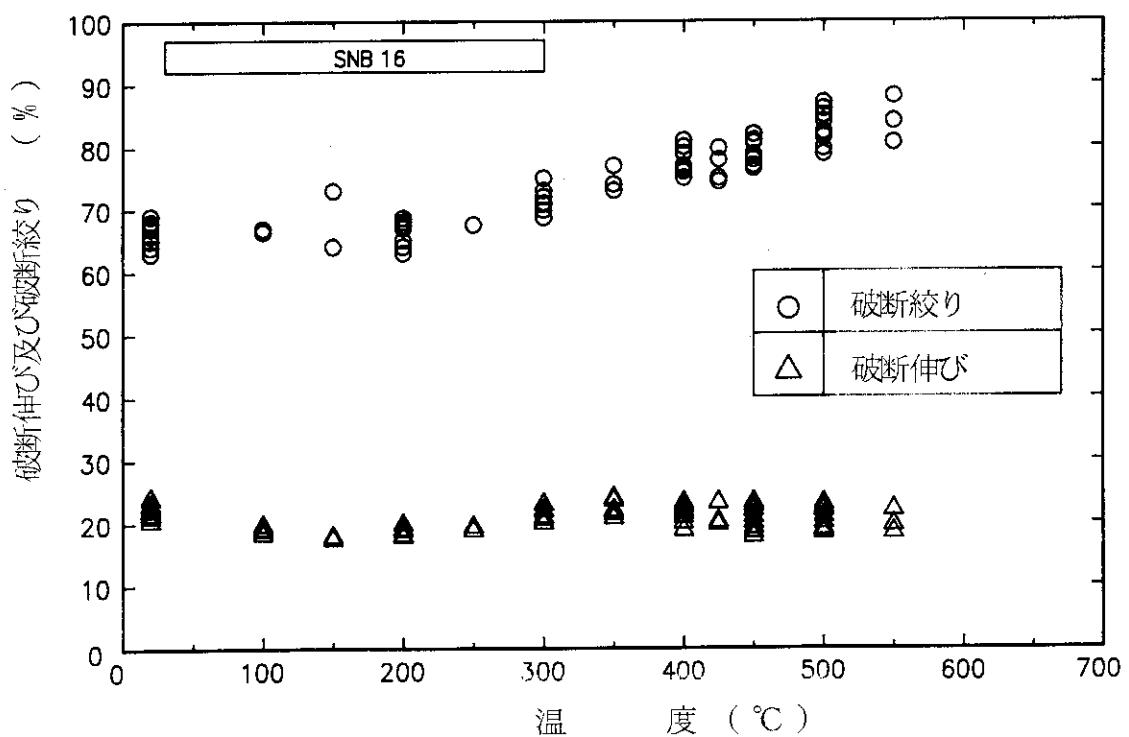


図 5 捕束ノバンドの構造説明図

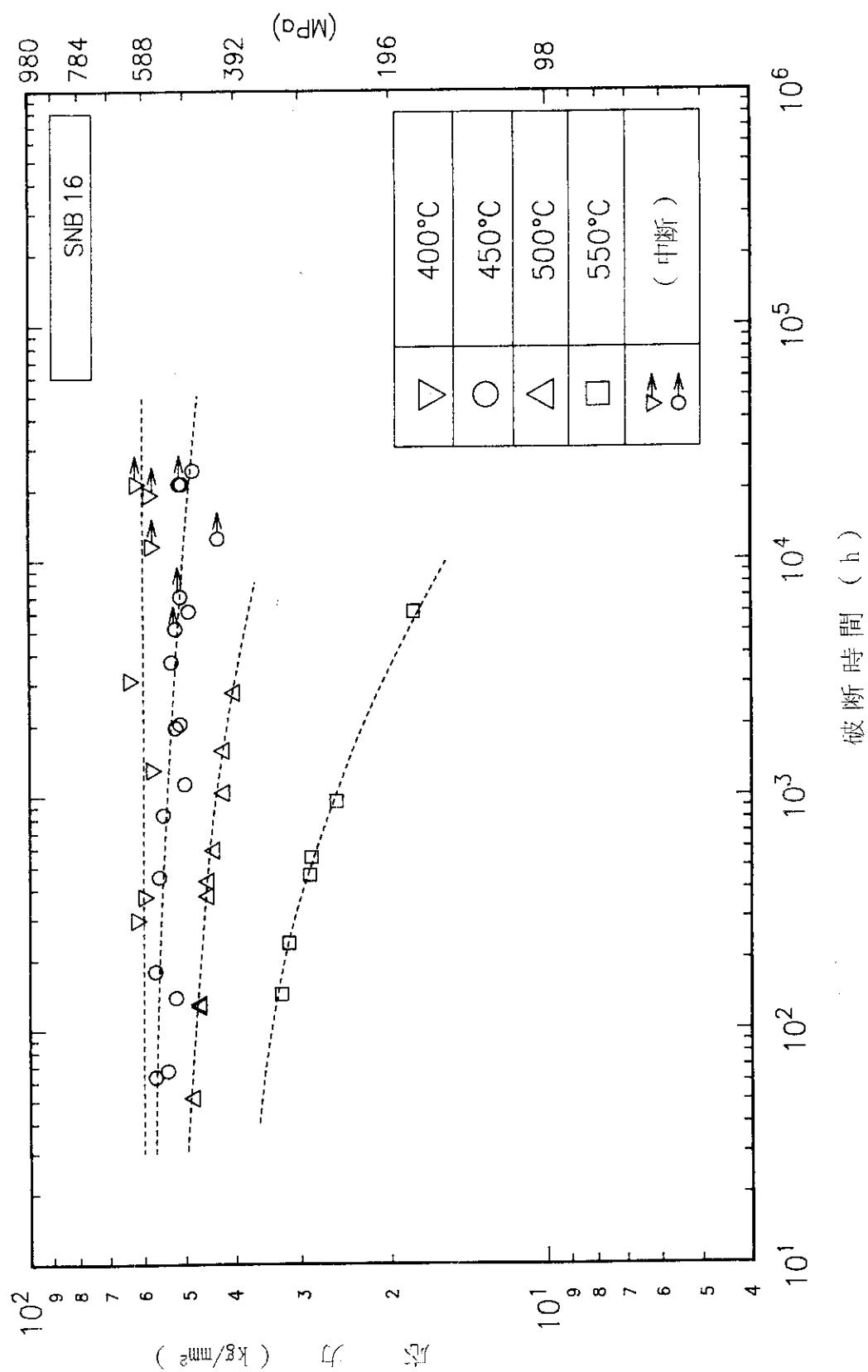


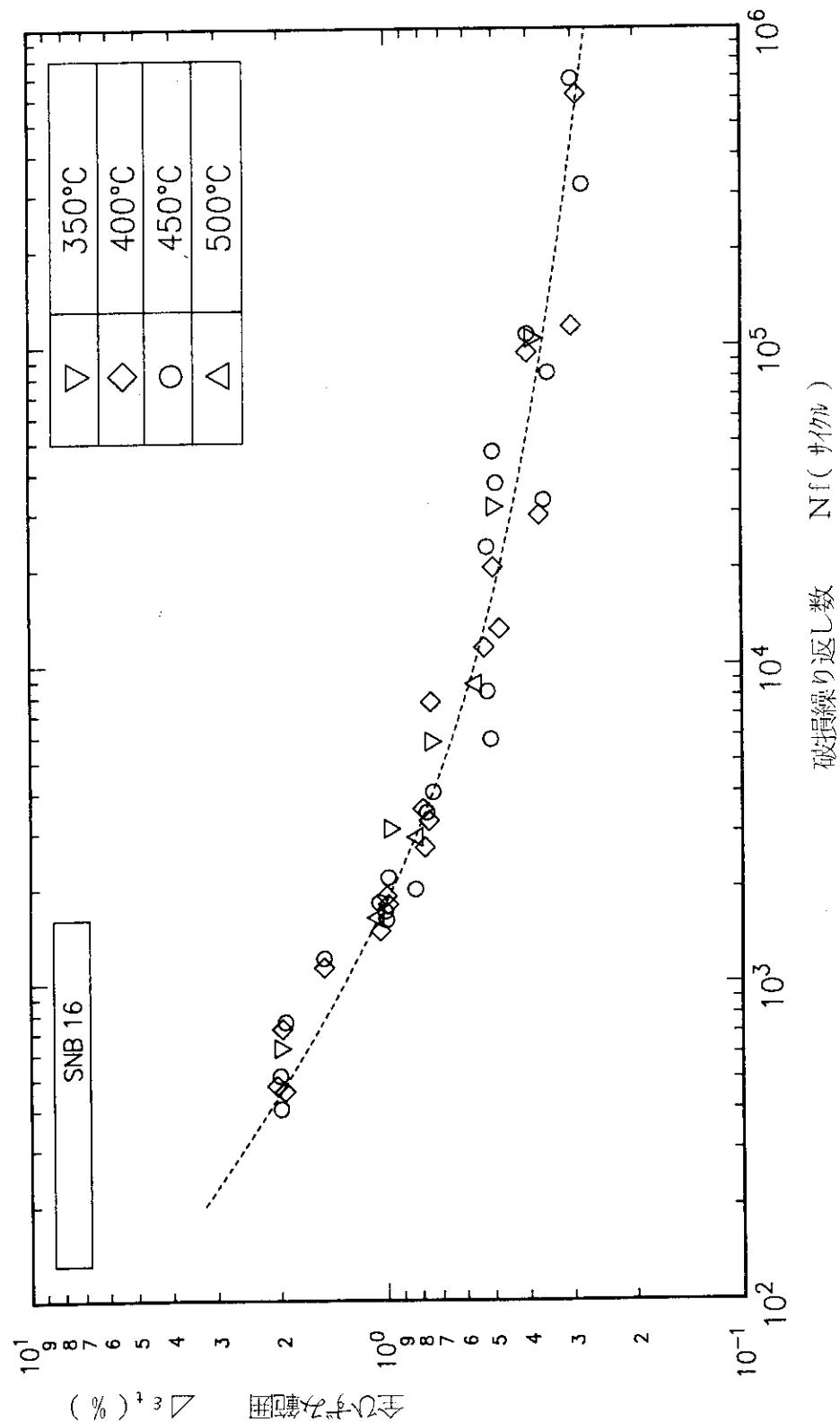
a) SNB16 材の引張強さ



b) SNB16 材の破断延性

図 6 SNB16 材の引張強度特性^{2), 3), 4), 5), 6)}

図 7 SNB16 材のクリープ破断強度特性²⁾、3)、4)、5)、6)、14)

図 8 SNB16 材の疲労強度特性^{2), 3), 4)}

3. 構造の規格の検討

前章での検討から、高温で使用されるボルト等及び拘束バンドの使用条件と使用材料の材料特性等の知見が得られた。更に、注目すべき知見としては、通常運転時のこれ等の金属温度は非クリープ温度域であって、異常過渡時及び事故時のみ、クリープ温度域に短時間入る使用条件であること、並びにSNB16は最高使用温度～450°C程度では、顕著なクリープ挙動は示さない等の知見が取得できたことである。

以下に、これ等の知見をふまえた本規定の策定に関わる基本的考え方を示す。

3.1 規格の策定方針

構造の規格の策定においては、機器の構造、使用材料、荷重形態・使用温度等の使用条件から、防止すべき破損モードを明確にする必要がある。これまでの検討から、高温で使用されるボルト等及び拘束バンドは下記の破損モードを考慮する。

- 短期荷重による延性破壊
- 長期荷重によるクリープ破壊
- クリープ・疲労破損
- ラチェックティング等による変形
- 短期荷重による座屈破損
- 長期荷重によるクリープ座屈破損
- 過大な変形（塑性変形及びクリープ変形）による機能喪失

これらの破損モードの内、短期荷重による、延性破損、座屈破損及び過大変形による機能喪失の各モードの防止には、これまでに検討した使用条件及び材料特性から、「告示」の当該規定を高温側に拡張して準用するのは妥当と判断できる。

長期荷重による、クリープ延性破損、クリープ・疲労破損等のクリープ挙動に関わる破損モードの防止については、上述の使用条件及び材料特性を考慮するとともに、「告示」の技術基準と「高温工学試験研究炉の高温構造設計方針」²¹⁾（以下、「高温構造設計方針」と云う）との整合性も考慮して、Code Case N-47等で云う「クリープ効果が顕著でない場合」の規定の考え方を準用して策定することとした。即ち、本規格の適用温度域として、最高使用温度を450°Cに制限するとともに、一次応力等の制限には使用時間依存の応力制限を設けるが、クリープ・疲労損傷制限は許容クリープ損傷を保守的に厳しく制限することで、Code Case N-47等の「クリープ疲労評価の代替法」の考え方を準用することとした。これは、クリープ損傷が十分小さい場合には、クリープ・疲労相互作用の詳細な評価の代わりに許容疲労損傷を保守的に厳しく制限することで、非クリープ温度域での疲労損傷評価法の準用で代替するものである。

本検討は主に耐圧バウンダリのテンションボルトを対象に実施したものであるが、炉心支持構造物のボルト等及び拘束バンドにおいても、類似の応力形態、即ち、主要な応力は単軸応力で自己拘束形の二次応力であることから、当面は、これ等の規格もテンションボルトの規格を準用することとした。

なお、本構造の規格の用語の定義は、本規格において特に定義する場合を除いて、「告示」及び「高温構造設計方針」に定めるところによる。

3.2 高温で使用される第1種機器のボルト等の構造の規格の検討

使用中の金属温度が「告示」の別表第3の適用温度範囲を超える場合のボルト等の構造の規格の基本的考え方を以下に示す。

ASME B&PV Code Case-N47のボルト等に対する設計規定を参考にするが「高温構造設計方針」との整合性及び低温側における「告示」との連続性並びに、「高温工学試験研究炉」での使用条件を考慮して、規格を定める。

イ) 一次応力制限の考え方

ボルト等における締付力等による二次応力は、寿命中に増締め等を行うと、一次応力的性格を有する様になる。このため、ボルト等の構造の規格では、使用状態における断面内引張応力（内圧等による一次応力と締付力等による二次応力との和）を、容器における一次応力の制限値に対応する値に制限する。

これに応じて、ボルト等の構造の規格では、内圧による一次応力を上記制限値の1/2の水準に制限する。

なお、内圧等による引張応力の制限については、各運転状態における制限の他に、設計状態に対しても制限を設けることとする。この場合、運転状態Ⅰに対しては二重規制になるが、高温での使用実績が豊富な、一般化工機での設計実績を考慮して同様の規定を設けるものである。

ロ) ひずみの制限の考え方

運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲの一次応力と二次応力の和を、降伏応力以下に制限するのでラチェット制限は不要と考えるが、「高温構造設計方針」との整合性を考慮して、一次応力と二次応力の組合せに対して、上記高温構造設計方針のクリープラチェットに係わる制限の内、累積される非弾性ひずみが無視できる非ラチェット領域であることを確認することとする。

運転状態Ⅳの短期荷重が繰返し性を有する場合（S2地震を想定）における進行性変形の制限は、高温構造設計方針の3.4.3の規定に準ずることとする。

ハ) クリープ・疲労損傷の考え方

運転状態Ⅰ、Ⅱ、Ⅲのボルト等の金属温度が450°C以下であって、「告示」の別表第3の適用温度範囲（SNB16は、425°C）を超える高温使用時間も短い場合で、更

に、一次応力と二次応力を加えた応力強さの値、並びにピーク応力強さもそれぞれ降伏応力以下に制限した場合には、累積クリープ損傷は十分小さいと判断できる。

一方、累積疲労損傷においても、同様の理由で十分小さいと判断できる。この様な使用条件のクリープ疲労損傷制限として、以下の イ)及び ロ)又は ハ)に定めるところを満足することとするのは、後述する理由で適當と考える。

〈クリープ疲労損傷の制限〉

イ) 運転状態 I、II 及び試験状態の各々の高温使用時間において生ずる一次応力と二次応力を加えた応力強さの当該時刻における値 S_i が各々の高温使用時間の間、当該時刻における金属温度 T_i で作用するとしたときの設計クリープ破断応力強さ S_R に定める許容時間； $t_R(S_i, T_i)$ の関数として定義した累積クリープ損傷係数 (Dc) は 0.1 以下とする。

$$D_c = 2 \int_0^{t^*} \frac{dt}{t_B(S_i, T_i)} \leq 0.1 \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

二〇六

t^* : 「告示」の別表第3の適用温度範囲を超える金属温度における使用時間の総和を下回らない時間 (h)

口) 運転状態 I、II 及び試験状態における累積損傷係数 (Df) は 0.1 以下とする。

ただし、「告示」の適用温度範囲内のひずみサイクルにあっては、「告示」の該当条項に定めるところにより、「疲れ累積係数」を算定し、これを Dfに加算するものとする。

なお、累積疲労損傷係数Dfの算定は、高温用に別に定める「設計疲れ線図」を用いて、「告示」の疲れ解析手順により算定するものとするが、繰返しピーク応力強さは降伏応力以下に制限することとする。

ハ) 「式(1)による累積クリープ損傷係数が $D_c > 0.1$ の場合は、クリープ疲労相互作用を適切に考慮して、クリープ疲労損傷の制限を満足することとする。」として、クリープが顕著な場合には、その妥当性が証明される規定を別途定めることは妨げないものとする

〈 $D_c \leq 0.1$ 及び $D_f \leq 0.1$ によりクリープ疲労損傷制限を満足することについて 〉

評価方法 1)に示すように、Dcの評価方法では応力緩和の効果等を考慮していないので Dc=0.1としても実際には $Dc \ll 0.1$ と考えられる。

SNB16材の類似材料である ASTM A470-8(1Cr-1Mo-0.25V)鋼のクリープ疲労相互作用に関するデータ²²⁾を参考にすると、 $D_c + D_f \leq D$ とした場合に $D_c \leq 0.1$ であれば、 $D_f \leq D - D_c < 0.5$ と判断できる。

これ等を勘案して、 $D=1.0$ とした場合に対して約1桁 D_f 値を下げるとして、 $D_f \leq 0.1$ とすればクリープ疲労損傷制限は十分満足できると考える。

運転状態Ⅲに対する疲労損傷評価は、使用条件としてクリープ効果が顕著でない温度領域であることを勘案して、「告示」の考え方と同様に、少數回挙動である運転状態Ⅲは削除することとする。

累積疲労損傷係数の算定法を「告示」の算定法に準じたのは、使用条件を勘案すると、応力緩和強さ (S_r) は考へているサイクル挙動時間では $S_r=1.5 S_m$ と見做せると考えるとともに、長時間サイクル挙動はひずみの制限で満足できると考える。また、これ等の効果が多少生じるとしても、 $D_f \leq 0.1$ の制限で補完していると考える。

3.3 高温で使用される炉心支持構造物のボルト等の構造の規格の検討

使用中の金属温度が「告示」別表第2の適用温度範囲を超える場合の炉心支持構造物のボルト等の構造の規格の基本的考え方を以下に示す。

なお、高温工学試験研究炉では炉心支持構造物のボルト等の使用予定はない。炉心支持鋼構造物は溶接構造または嵌合構造を用いており、炉心荷重をボルト等で直接支持する構造は採用していない。原子炉内で使用するボルト類はいづれも炉内構造物組立時の初期位置決め用または部品の取付に用いるものである。また、「告示」の別表第2には SNB16材の規定が無いので、425°Cまでの規定追加が必要である。

ここでは、現状で策定し得る規格の考え方を示す。

「告示」の解説では、「炉心支持構造物のボルト等は、漏れ防止を目的とせず、第1種容器のボルト等とは機能的に異なる締付け金具のことであって、その許容応力の決め方はむしろボルト以外の構造に対するものに近くなっている。」として、ボルト等の構造の規格は相対的に容器の構造の規格に類似している。即ち、運転状態I、IIにおける一次膜応力と二次膜応力との和 (P_m+Q_m) の許容値については、ボルト等を弾性範囲内で使用するものとして、 $0.9 S_y$ 又は $2/3 S_u$ で制限している。運転状態Ⅲ及びIVにおいては、ボルト等は弾性域で挙動する必要はなく、他の部分と同等な安全率が確保されればよいとの観点から、許容応力は一般の炉心支持構造物（ほぼ容器に同じ）に合わせてある。

これに対して、我国では SNB16材を用いたボルトの炉心支持構造物としての使用実績がなく、むしろ、一般化工機の高温容器ボルト（第1種容器ボルトの規格と同等）としての使用実績が豊富であることを考慮すると、現段階においては、保守的な規定として、高温で使用されるボルト等は「告示」よりも許容応力を厳しく制限する意味で、運転状態Ⅲにおいても弾性域で挙動するよう制限することとする。

この結果、高温で使用される炉心支持構造物のボルト等の構造の規格は、高温で使用される第1種容器のボルト等の構造の規格を準用することとする。

3.4 高温で使用される炉心支持構造物の拘束バンドの構造の規格の検討

使用中の金属温度が「告示」の別表第2の適用温度範囲を超える場合の拘束バンドの構造の規格の基本的考え方を以下に示す。

前述したように、「告示」では拘束バンドの構造規定はない。また、SNB16材は別表第2に規定されていない。ここでは、「告示」の炉心支持構造物及び別表第2の規定にそれぞれ、拘束バンドの構造規定及びSNB16材の強度規定(～425°Cまで)を追加することを前提として検討を実施した。

拘束バンドの構造及び機能は「2. ボルト等及び拘束バンドの概要検討」に示した通りである。図5に示す様に、拘束バンドは引張ばね要素として機能し、拘束バンドに生ずる応力は、ボルト等に生ずる二次応力と同様の応力と考えられる。

「告示」の「ボルト締付応力分類」では、「ボルト等に生ずる二次応力とは、ボルト等の締付力、熱膨張差等によって生ずるボルト締付力の変化分を合わせて求めた荷重による応力である。一般にボルト等は、その締付力に応じた軸力によりわずかに伸びてつり合うが、締付力が一定であれば材料が降伏したものとしてもこの変形は進行しない。すなわち、自己拘束性がある。したがって、熱変形による応力と同様に締付力による応力は二次応力として扱われる。」と解説されている。拘束バンドに生ずる応力は、「告示」で云う自己拘束性の応力であり二次応力として分類するのが適当と考える。

従って、「告示」の規定準拠の観点からは、高温で使用される拘束バンドの構造の規格は、炉心支持構造物のボルト等の構造の規格を高温側に拡張して準用するのが適当と考えられる。

しかしながら、拘束バンドの高温長時間連続使用の使用実績は豊富とはいえないことを考慮すると、現段階においては保守的な規定として、「告示」の炉心支持構造物のボルト等の構造の規格よりも、許容応力を厳しく制限する意味で、運転状態Ⅲにおいても弾性域で挙動するよう制限を定める、高温で使用される第1種容器のボルト等の構造の規格を準用するのが適当と考える。なお、拘束バンドの圧縮荷重を受ける円筒胴部位の座屈制限は、「告示」の第1種容器の座屈制限を準用するのが適当と考える。

4. 高温で使用されるボルト等及び拘束バンドの構造の規格

前章で検討した策定方針及び基本的考えに基づき策定した、高温で使用されるボルト等及び拘束バンドの構造の規格を以下に示す。なお、各構造の規格で使用する材料強度等の基準は付録に記載した。材料強度基準等の策定に関する詳細は別報で報告する。

4.1 高温で使用される高温工学試験研究炉第1種容器のボルト等の構造の規格

(適用範囲)

4.1.1 高温工学試験研究炉第1種容器のボルト等の使用中の金属温度が「告示」の適用温度範囲を超える場合であって、その金属温度及び高温使用時間が付1.1表 (S_{0B}) から付1.3-(a)表 (S_{mtB}) までの適用範囲を超えない場合は、本規格を適用することができる。ここで高温使用時間とは「告示」の別表第3の適用温度範囲を超える金属温度における使用時間の総和をいう。

(設計の方法)

4.1.2 高温で使用される高温工学試験研究炉第1種容器のボルト等の設計は原則として弾性解析による設計とする。

(応力強さの限界及び許容応力)

4.1.3 高温で使用される高温工学試験研究炉第1種容器のボルト等の応力強さの限界及び許容応力は、次に掲げるとおりとする。

- イ. 最高使用圧力におけるボルト荷重及びガスケット締付時のボルト荷重により生ずる平均引張応力は、各々最高使用温度における付1.1表 (S_{0B}) に定める値を超えないこと。
- ロ. 運転状態Ⅰ、Ⅱ及び運転状態Ⅲにおいて生ずる応力は次の値を超えないこと。
 - (イ) 運転圧力により生ずる平均引張応力及びガスケット締付時のボルト荷重により生ずる平均引張応力は、各々考えている負荷状態の最高断面平均金属温度及びその状態の累積持続時間に対して付1.3-(a)表 (S_{mtB}) に定める値
 - (ロ) 長期及び短期荷重による一次一般膜応力と長期及び短期二次膜応力との和は、考えている負荷状態の最高断面平均金属温度に対して付1.2表 (S_{mB}) に定める値の2倍の値
 - (ハ) 長期荷重による一次一般膜応力と長期二次膜応力との和は、考えている負荷状態の最高断面平均金属温度及びその状態の累積持続時間に対して付1.3-(a)表 (S_{mtB}) に定める値の2倍の値
 - (ニ) 長期及び短期荷重による一次一般膜応力及び一次曲げ応力と、長期及び短

期二次応力との和は、考えている負荷状態の最高断面平均金属温度に対して付1.2表 (S_{mt_B}) に定める値の3倍の値

- (ホ) 長期荷重による一次一般膜応力及び一次曲げ応力と長期二次応力との和は、考えている負荷状態の最高断面平均金属温度及びその状態の累積持続時間に対して付1.3-(a)表 (S_{mt_B}) に定める値の2倍に係数Ktを乗じた値
ただし、係数Ktは以下によるものとする。

$$Kt = 1 + ks \left(1 - \frac{\langle P_m + Q_m \rangle}{2S_{mt_B}} \right)$$

$$ks = \alpha c (Ks - 1)$$

ここで、

P_m : 長期荷重による一次一般膜応力

Q_m : 長期二次膜応力

S_{mt_B} : 考えている負荷状態の最高断面平均金属温度及びその累積持続時間に対して付1.3-(a)表に定める値

αc : クリープ係数、 $\alpha c = 0.5$ とする。

Ks : 断面形状係数、「高温構造設計方針」別表2.2に準拠して定めるものとする。

ハ. 運転状態Ⅰ、Ⅱ及び運転状態Ⅲにわたって次の制限を満足すること。

- (イ) 長期荷重による一次一般膜応力と長期二次膜応力との和に対する使用分数和はB値(1.0とする)を超えないこと。

$$\sum_i \frac{t_i}{t_{mi}} \leq B$$

ここで、

t_i : 断面平均金属温度が T_i 、応力強さが $\langle P_m + Q_m \rangle_i$ である負荷状態*i*の累積持続時間(h)。 $\sum t_i$ は「告示」の適用温度範囲を超える金属温度における使用時間の総和を下回ってはならない。

t_{mi} : 温度 T_i 、応力強さ $0.5 \langle P_m + Q_m \rangle_i$ に対して付1.3-(a)表(S_{mt_B})に定める許容時間(h)

- (ロ) 長期荷重による一次一般膜応力及び一次曲げ応力と長期二次応力との和を係数Ktで除した値に対する使用分数和は1.0を超えないこと。

$$\sum_j \frac{t_j}{t_{bj}} \leq 1.0$$

ここで、

t_j : 断面平均金属温度が T_j 、応力強さが $\langle P_m + P_b + Q \rangle_j$ である負荷状態*j*の累積持続時間(h)。 $\sum t_j$ は「告示」の適用温度範囲を超える金属温度における使用時間の総和を下回ってはならない。

t_{bj} : 温度 T_j 、応力強さ $0.5 (\langle P_m + P_b + Q \rangle / Kt)_j$ に対して付1.3-(a)表(S_{mt_B})に定める許容時間(h)

Kt : 4.1.3 ロ(ホ)に定めるところによる。

ニ. 運転状態IVにおいて生ずる応力は、次の値を超えないこと。

- (イ) 長期及び短期荷重による一次一般膜応力と長期及び短期二次膜応力との和は、考えている負荷状態における最高断面平均金属温度に対して、付1.4表(S_u)に定める値の3分の2倍の値
- (ロ) 長期荷重による一次一般膜応力と長期二次膜応力との和は、考えている負荷状態における最高断面平均金属温度及びその状態の持続時間に対して付1.5-(a)表(S_R)に定める値の3分の2倍の値
- (ハ) 長期及び短期荷重による一次一般膜応力、長期及び短期荷重による一次曲げ応力及び長期及び短期二次応力の和は、(イ)に定める値の1.5倍の値
- (エ) 長期荷重による一次一般膜応力及び一次曲げ応力と長期二次応力の和は、(ロ)に定める値に係数K_tを乗じた値。ただし、K_tは、2S_mt_bを付1.6-(a)表のS_tに読み替えるものとする。

ホ. 運転状態 I、II、III及び運転状態IVにわたって次の制限を満足すること。

- (イ) 長期荷重による一次一般膜応力と長期二次膜応力との和の1.5倍の値に対する使用分数和はB_R値(1.0とする)を超えないこと。

$$\sum_i \frac{t_i}{t_{R,i}} \leq B_R$$

ここで、

t_i : 4.1.3 ハ(イ)に定めるところによる。

$t_{R,i}$: 温度T_i、応力強さ $1.5(P_m+Q_m)_i$ に対して付1.5-(a)表(S_R)に定める許容時間(h)

- (ロ) 長期荷重による一次一般膜応力、一次曲げ応力及び長期二次応力の和を係数K_tで除した値の1.5倍の値に対する使用分数和は1.0を超えないこと。

$$\sum_j \frac{t_j}{t_{R,bj}} \leq 1.0$$

ここで、

t_j : 4.1.3 ハ(ロ)に定めるところによる。

$t_{R,bj}$: 温度T_j、応力強さ $1.5(P_m+P_b+Q)_j/K_t$ に対して付1.5-(a)表(S_R)に定める許容時間(h)

K_t : 4.1.3 ロ(ホ)に定めるところによるが、2S_mt_bを付1.6-(a)表のS_tに読み替えるものとする。

ヘ. 「告示」の適用温度範囲を超える試験状態においては、本規定第4.1.3項ロ号、ハ号及びホ号に定める運転状態IIに関する制限を満足すること。

(ひずみの制限)

4.1.4

4.1.4.1 高温で使用される高温工学試験研究炉第1種容器のボルト等の運転状態I、II、III及び試験状態において生ずるひずみは次の値を超えないこと。

- イ. ボルト等の累積非弾性ひずみは、次の(イ)及び(ロ)の制限値を超えてはならない。この制限は、3つの主ひずみのうちの最大正値に対して適用する。

- (イ) 断面平均ひずみ 0.01
 (ロ) 断面内の等価線形ひずみ分布により定める表面ひずみ 0.02
 ここにひずみの単位はmm/mmである。

ロ. 弹性解析により、次の制限を満足する場合は、4.1.4.1 イを満足するものと
 することができる。

運転状態 I、II、III及び試験状態のすべての負荷サイクルにおける $\langle Q+Q^* \rangle_R$
 に関して次式を満足すること。

$$\langle P_m + P_{m*} + (P_b + P_{b*}) / K_t \rangle_{max} + \langle Q+Q^* \rangle_R \leq S_a$$

ここに記号 $\langle \sigma \rangle$ は応力 σ に関する負荷サイクル中の応力強さ範囲を表わす
 ものであり、下つき添字maxは添字を付した量の運転状態 I、II及び試験状態を
 通しての最大値を表わす。

- P_m* : 短期荷重による一次一般膜応力
 P_b : 長期荷重による一次曲げ応力
 P_{b*} : 短期荷重による一次曲げ応力
 Q : 長期2次応力
 Q^* : 短期2次応力
 K_t : 4.1.3 ロ(ホ)に定めるところによる。

S_a は次の(イ)又は(ロ)に定める値のうちいずれか小さい方の値とする。

- (イ) 運転状態 I、II及び試験状態を通しての最高断面平均金属温度に対して時
 間を $10^4 h$ として付1.6-(a)表(S_t)に定める値の1.25倍の値。
 (ロ) 評価の対象とする $\langle Q+Q^* \rangle_R$ が属する負荷サイクルの最高断面平均金属温
 度及び最低断面平均金属温度のそれぞれに対して付1.7表(S_y)又は「告示」
 の別表第9に定める値の平均値。

ただし評価の対象とする $\langle Q+Q^* \rangle_R$ を定める応力状態のうち少くともひと
 つの状態における断面平均金属温度が次に定める温度 T_0 より低い場合は、
 (イ)の値にかかわらず(ロ)の値によって S_a の値を定めることができる。ここに
 温度 T_0 は、付1.8表(S_m)に定める値が時間を $10^5 h$ として付1.6-(a)表(S_t)に
 定める値に等しい温度である。

4.1.4.2 高温で使用される高温工学試験研究炉第1種容器のボルト等の運転状態IV
 に関するひずみの制限については、「高温構造設計方針」3.4.3に定めるところに
 よる。ただし、「壁厚」は「断面」に、PLは P_m に、PL*は P_{m*} に、別表1.2(別図
 1.2)は、付1.8表(S_m)にそれぞれ読み替えるものとする。

(クリープ疲労損傷の制限)

4.1.5 高温で使用される高温工学試験研究炉第1種容器のボルト等の運転状態I、
 II及び試験状態において生ずるクリープ疲労損傷の制限は次のイ及びロ又はハに定
 めるところを満足することとする。

イ. 運転状態 I、II 及び試験状態にわたって、累積クリープ損傷係数 (D_c) に関する次の制限を満足しなければならない。

$$D_c = 2 \int_0^{t^*} \frac{dt}{t_R(S_i, T_i)} \leq 0.1 \quad (4.1.5-1)$$

ここで、

- t^* : 「告示」の別表第3の適用温度範囲を超える金属温度における使用時間の総和を下回らない時間 (h)
- S_i : 高温使用時間の各時刻において生ずる一次応力と二次応力を加えた応力強さ
- T_i : 高温使用時間の各時刻において生ずる金属温度
- $t_R(S_i, T_i)$: 温度(T_i)、応力強さ(S_i)に対して付1.5-(a)表(S_R)に定める許容時間(h)

ロ. 運転状態 I、II 及び試験状態にわたって、累積疲労損傷係数 (D_f) は0.1以下でなければならない。ただし、「告示」の適用温度範囲内のひずみサイクルにあっては、「告示」の該当条項に定めるところにより「疲れ累積係数」を算定し、これを D_f に加算するものとする。なお、「告示」の別図第1(設計疲れ線図)は付1.1-(a)図(設計疲れ線図)に読み替えることができる。

累積疲労損傷係数 (D_f) は付1.1-(a)図(設計疲れ線図)を用いて「告示」の疲れ解析に準拠するものとするが、繰返しひーク応力強さは付1.7表(S_y)の値を超えてはならないものとする。

ハ. (4.1.5-1)式による累積クリープ損傷係数が $D_c > 0.1$ の場合は、クリープ疲労相互作用を適切に考慮して、クリープ疲労損傷の制限を満足すること。

(疲れ強度減少係数等)

4.1.6 疲れ解析に使用する疲れ強度減少係数及び応力集中係数は、理論的又は実験的に求めたものでなければならない。

4.2 高温で使用される高温工学試験研究炉炉心支持構造物のボルト等の構造の規格

(適用範囲)

4.2.1.1 高温工学試験研究炉炉心支持構造物のボルト等の使用中の金属温度が「告示」の適用温度範囲を超える場合であって、その金属温度及び高温使用時間が付1.1表 (S_{0B}) から付1.3-(a)表 (S_{mtB})までの適用範囲を超えない場合は、本規格を適用することができる。ここで高温使用時間とは「告示」の別表第2の適用温度範囲を超える金属温度における使用時間の総和をいう。

(設計の方法)

4.2.2.1 高温で使用される高温工学試験研究炉炉心支持構造物のボルト等の設計は原則として弾性解析による設計とする。

(応力強さの限界及び許容応力)

4.2.3.1 高温で使用される高温工学試験研究炉炉心支持構造物のボルト等の応力強さの限界及び許容応力は、次に掲げるとおりとする。

イ. 最高使用圧力及び機械的荷重におけるボルト荷重並びに構造物締付時のボルト荷重により生ずる平均引張応力は、最高使用温度における付1.1表 (S_{0B}) に定める値を超えないこと。

ロ. 運転状態Ⅰ、Ⅱ及び運転状態Ⅲにおいて生ずる応力は次の値を超えないこと。

(イ) 長期及び短期荷重による一次一般膜応力と長期及び短期二次膜応力との和は、考えている負荷状態の最高断面平均金属温度に対して付1.2表 (S_{mB})に定める値の2倍の値

(ロ) 長期荷重による一次一般膜応力と長期二次膜応力との和は、考えている負荷状態の最高断面平均金属温度及びその状態の累積持続時間に対して付1.3-(a)表 (S_{mtB})に定める値の2倍の値

(ハ) 長期及び短期荷重による一次一般膜応力及び一次曲げ応力と、長期及び短期二次応力との和は、考えている負荷状態の最高断面平均金属温度に対して付1.2表 (S_{mB})に定める値の3倍の値

(ニ) 長期荷重による一次一般膜応力及び一次曲げ応力と長期二次応力との和は、考えている負荷状態の最高断面平均金属温度及びその状態の累積持続時間に対して付1.3-(a)表 (S_{mtB})に定める値の2倍に係数Ktを乗じた値

ただし、係数Ktは以下によるものとする。

$$Kt = 1 + ks \left(1 - \frac{\langle P_m + Q_m \rangle}{2S_{mtB}} \right)$$

$$ks = \alpha c (Ks - 1)$$

ここで、

- P_m : 長期荷重による一次一般膜応力
- Q_m : 長期二次膜応力
- S_{mt_B} : 考えている負荷状態の最高断面平均金属温度及びその累積持続時間に対して付1.3-(a)表に定める値
- αc : クリープ係数、 $\alpha c=0.5$ とする。
- K_s : 断面形状係数、「高温構造設計方針」別表2.2に準拠して定めるものとする。

ハ. 運転状態Ⅰ、Ⅱ及び運転状態Ⅲにわたって次の制限を満足すること。

- (イ) 長期荷重による一次一般膜応力と長期二次膜応力との和に対する使用分数和はB値(1.0とする)を超えないこと。

$$\sum_i \frac{t_i}{t_{mi}} \leq B$$

ここで

- t_i : 断面平均金属温度が T_i 、応力強さが $\langle P_m + Q_m \rangle_i$ である負荷状態*i*の累積持続時間(h)。 $\sum t_i$ は「告示」の適用温度範囲を超える金属温度における使用時間の総和を下回ってはならない。
- t_{mi} : 温度 T_i 、応力強さ $0.5 \langle P_m + Q_m \rangle_i$ に対して付1.3-(a)表(S_{mt_B})に定める許容時間(h)

- (ロ) 長期荷重による一次一般膜応力及び一次曲げ応力と長期二次応力との和を係数 K_t で除した値に対する使用分数和は1.0を超えないこと。

$$\sum_j \frac{t_j}{t_{bj}} \leq 1.0$$

ここで

- t_j : 断面平均金属温度が T_j 、応力強さが $\langle P_m + P_b + Q \rangle_j$ である負荷状態*j*の累積持続時間(h)。 $\sum t_j$ は「告示」の適用温度範囲を超える金属温度における使用時間の総和を下回ってはならない。
- t_{bj} : 温度 T_j 、応力強さ $0.5 (\langle P_m + P_b + Q \rangle / K_t)_j$ に対して付1.3-(a)表(S_{mtB})に定める許容時間(h)
- K_t : 4.2.3 ロ(ニ)に定めるところによる。

ニ. 運転状態Ⅳにおいて生ずる応力は、次の値を超えないこと。

- (イ) 長期及び短期荷重による一次一般膜応力と長期及び短期二次膜応力との和は、考えている負荷状態における最高断面平均金属温度に対して、付1.4表(S_u)に定める値の3分の2倍の値
- (ロ) 長期荷重による一次一般膜応力と長期二次膜応力との和は、考えている負荷状態における最高断面平均金属温度及びその状態の持続時間に対して付1.5-(a)表(S_R)に定める値の3分の2倍の値
- (ハ) 長期及び短期荷重による一次一般膜応力、長期及び短期荷重による一次曲げ応力及び長期及び短期二次応力の和は、(イ)に定める値の1.5倍の値

- (e) 長期荷重による一次一般膜応力及び、一次曲げ応力と長期二次応力の和は、
(ロ)に定める値に係数Ktを乗じた値。ただし、Ktは、 $2Smt_B$ を付1.6-(a)表の
Stに読み替えるものとする。

ホ. 運転状態 I、II、III及び運転状態IVにわたって次の制限を満足すること。

- (イ) 長期荷重による一次一般膜応力と長期二次膜応力との和の1.5倍の値に対する
使用分数和は B_R 値(1.0とする)を超えないこと。

$$\sum_i \frac{t_i}{t_{R,i}} \leq B_R$$

ここで、

t_i : 4.2.3 ハ(イ)に定めるところによる。

$t_{R,i}$: 温度 T_i 、応力強さ $1.5(P_m+Q_m)_i$ に対して付1.5-(a)表(SR)に定める
許容時間(h)

- (ロ) 長期荷重による一次一般膜応力、一次曲げ応力及び長期二次応力の和を係
数Ktで除した値の1.5倍の値に対する使用分数和は1.0を超えないこと。

$$\sum_j \frac{t_j}{t_{R,bj}} \leq 1.0$$

ここで、

t_j : 4.2.3 ハ(ロ)に定めるところによる。

$t_{R,bj}$: 温度 T_j 、応力強さ $1.5((P_m+P_b+Q)/Kt)_j$ に対して付1.5-(a)表
(SR)に定める許容時間(h)

Kt : 4.2.3 ロ(イ)に定めるところによるが、 $2Smt_B$ を付1.6-(a)表の
Stに読み替えるものとする。

ヘ. 「告示」の適用温度範囲を超える試験状態においては、本規定第4.2.3項ロ号、
ハ号及びホ号に定める運転状態IIに関する制限を満足すること。

(ひずみの制限)

4.2.4

4.2.4.1 高温で使用される高温工学試験研究炉炉心支持構造物のボルト等の運転状
態I、II、III及び試験状態において生ずるひずみは次の値を超えないこと。

イ. ボルト等の累積非弾性ひずみは、次の(イ)及び(ロ)の制限値を超えてはならな
い。この制限は、3つの主ひずみのうちの最大正値に対して適用する。

(イ) 断面平均ひずみ 0.01

(ロ) 断面内の等価線形ひずみ分布により定める表面ひずみ 0.02

ここにひずみの単位はmm/mmである。

ロ. 弹性解析により、次の制限を満足する場合は、4.2.4.1 イを満足するものと
することができる。

運転状態I、II、III及び試験状態のすべての負荷サイクルにおける $\langle Q+Q^* \rangle_R$
に関して次式を満足すること。

$$\langle P_m + P_{m*} + (P_b + P_{b*}) / Kt \rangle_{max} + \langle Q + Q^* \rangle_R \leq S_a$$

ここに記号 $\langle \sigma \rangle$ は応力 σ に関する負荷サイクル中の応力強さ範囲を表わすものであり、下つき添字maxは添字を付した量の運転状態Ⅰ、Ⅱ及び試験状態を通しての最大値を表わす。

P_{m*} : 短期荷重による一次一般膜応力

P_b : 長期荷重による一次曲げ応力

P_{b*} : 短期荷重による一次曲げ応力

Q : 長期2次応力

Q^* : 短期2次応力

K_t : 4.2.3 ロ(ニ)に定めるところによる。

S_a は次の(イ)又は(ロ)に定める値のうちいずれか小さい方の値とする。

(イ) 運転状態Ⅰ、Ⅱ及び試験状態を通しての最高断面平均金属温度に対して時間を $10^4 h$ として付1.6-(a)表(S_t)に定める値の1.25倍の値。

(ロ) 評価の対象とする $\langle Q+Q^* \rangle_R$ が属する負荷サイクルの最高断面平均金属温度及び最低断面平均金属温度のそれぞれに対して付1.7表(S_y)又は「告示」の別表第9に定める値の平均値。

ただし評価の対象とする $\langle Q+Q^* \rangle_R$ を定める応力状態のうち少くともひとつの状態における断面平均金属温度が次に定める温度 T_0 より低い場合は、(イ)の値にかかわらず(ロ)の値によって S_a の値を定めることができる。ここに温度 T_0 は、付1.8表(S_m)に定める値が時間を $10^6 h$ として付1.6-(a)表(S_t)に定める値に等しい温度である。

4.2.4.2 高温で使用される高温工学試験研究炉炉心支持構造物のボルト等の運転状態IVに関するひずみの制限については、「高温構造設計方針」3.4.3に定めるところによる。ただし、「壁厚」は「断面」に、PLは P_m に、PL*は P_{m*} に、別表1.2(別図1.2)は、付1.8表(S_m)にそれぞれ読み替えるものとする。

(クリープ疲労損傷の制限)

4.2.5 高温で使用される高温工学試験研究炉炉心支持構造物のボルト等の運転状態Ⅰ、Ⅱ及び試験状態において生ずるクリープ疲労損傷の制限は次のイ及びロ又はハに定めるところを満足することとする。

イ、運転状態Ⅰ、Ⅱ及び試験状態にわたって、累積クリープ損傷係数(D_c)に関する次の制限を満足しなければならない。

$$D_c = 2 \int_0^{t^*} \frac{dt}{t_R(S_i, T_i)} \leq 0.1 \quad (4.2.5-1)$$

ここで、

t^* : 「告示」の別表第2の適用温度範囲を超える金属温度における使用時間の総和を下回らない時間(h)

S_i : 高温使用時間の各時刻において生ずる一次応力と二次応力を加えた応力強さ

T_i : 高温使用時間の各時刻において生ずる金属温度

$t_R(S_i, T_i)$: 温度(T_i)、応力強さ(S_i)に対して付1.5-(a)表(S_R)に定める許容時間(h)

ロ. 運転状態 I、II 及び試験状態にわたって、累積疲労損傷係数 (Df) は0.1以下でなければならない。ただし、「告示」の適用温度範囲内のひずみサイクルにあっては、「告示」の該当条項に定めるところにより「疲れ累積係数」を算定し、これをDfに加算するものとする。なお、「告示」の別図第1（設計疲れ線図）は付1.1-(a)図（設計疲れ線図）に読み替えることができる。

累積疲労損傷係数 (Df) は付1.1-(a)図（設計疲れ線図）を用いて「告示」の疲れ解析に準拠するものとするが、繰返しひーク応力強さは付1.7表(S_y)の値を超えてはならないものとする。

ハ. (4.2.5-1)式による累積クリープ損傷係数が $D_c > 0.1$ の場合は、クリープ疲労相互作用を適切に考慮して、クリープ疲労損傷の制限を満足すること。

(疲れ強度減少係数等)

4.2.6 疲れ解析に使用する疲れ強度減少係数及び応力集中係数は、理論的又は実験的に求めたものでなければならない。

4.3 高温で使用される高温工学試験研究炉炉心支持構造物の拘束バンドの構造の規格

(適用範囲)

4.3.1 高温工学試験研究炉炉心支持構造物の拘束バンドの使用中の金属温度が「告示」の適用温度範囲を超える場合であって、その金属温度及び高温使用時間が付1.1表(S_{0B})から付1.3表(S_{mt_B})までの適用範囲を超えない場合は、本規格を適用することができる。ここで高温使用時間とは「告示」の別表第2の適用温度範囲を超える金属温度における使用時間の総和をいう。

(設計の方法)

4.3.2 高温で使用される高温工学試験研究炉炉心支持構造物の拘束バンドの設計は原則として弾性解析による設計とする。

(応力強さの限界及び許容応力)

4.3.3 高温で使用される高温工学試験研究炉炉心支持構造物の拘束バンドの応力強さの限界及び許容応力は、次に掲げるとおりとする。

- イ. 機械的荷重及び炉心締付時の拘束バンド荷重により生ずる円筒部及び棒部の平均引張応力と平均圧縮応力は、最高使用温度における付1.1表(S_{0B})に定める値を超えないこと。
- ロ. 運転状態Ⅰ、Ⅱ及び運転状態Ⅲにおいて生ずる応力は次の値を超えないこと。
 - (イ) 長期及び短期荷重による一次一般膜応力と長期及び短期二次膜応力との和は、考えている負荷状態の最高断面平均金属温度に対して付1.2表(S_{mB})に定める値の2倍の値
 - (ロ) 長期荷重による一次一般膜応力と長期二次膜応力との和は、考えている負荷状態の最高断面平均金属温度及びその状態の累積持続時間に対して付1.3表(S_{mt_B})に定める値の2倍の値
 - (ハ) 長期及び短期荷重による一次一般膜応力及び一次曲げ応力と、長期及び短期二次応力との和は、考えている負荷状態の最高断面平均金属温度に対して付1.2表(S_{mB})に定める値の3倍の値
 - (ニ) 長期荷重による一次一般膜応力及び一次曲げ応力と長期二次応力との和は、考えている負荷状態の最高断面平均金属温度及びその状態の累積持続時間に対して付1.3表(S_{mt_B})に定める値の2倍に係数 K_t を乗じた値
ただし、係数 K_t は以下によるものとする。

$$K_t = 1 + k_s \left(1 - \frac{P_m + Q_m}{2S_{mt_B}} \right)$$

$$k_s = \alpha c (K_s - 1)$$

ここで、

- P_m : 長期荷重による一次一般膜応力
- Q_m : 長期二次膜応力
- S_{mt_B} : 考えている負荷状態の最高断面平均金属温度及びその累積持続時間に対して付1.3表に定める値
- α_c : クリープ係数、 $\alpha_c = 0.5$ とする。
- K_s : 断面形状係数、「高温構造設計方針」別表2.2に準拠して定めるものとする。

ハ. 運転状態Ⅰ、Ⅱ及び運転状態Ⅲにわたって次の制限を満足すること。

- (イ) 長期荷重による一次一般膜応力と長期二次膜応力との和に対する使用分数和はB値(1.0とする)を超えないこと。

$$\sum_i \frac{t_i}{t_{mi}} \leq B$$

ここで

- t_i : 断面平均金属温度が T_i 、応力強さが $\langle P_m + Q_m \rangle_i$ である負荷状態*i*の累積持続時間(h)。 $\sum t_i$ は「告示」の適用温度範囲を超える金属温度における使用時間の総和を下回ってはならない。
- t_{mi} : 温度 T_i 、応力強さ $0.5 \langle P_m + Q_m \rangle_i$ に対して付1.3表(S_{mt_B})に定める許容時間(h)

- (ロ) 長期荷重による一次一般膜応力及び一次曲げ応力と長期二次応力との和を係数 K_t で除した値に対する使用分数和は1.0を超えないこと。

$$\sum_j \frac{t_j}{t_{bj}} \leq 1.0$$

ここで

- t_j : 断面平均金属温度が T_j 、応力強さが $\langle P_m + P_b + Q \rangle_j$ である負荷状態*j*の累積持続時間(h)。 $\sum t_j$ は「告示」の適用温度範囲を超える金属温度における使用時間の総和を下回ってはならない。
- t_{bj} : 温度 T_j 、応力強さ $0.5 (\langle P_m + P_b + Q \rangle / K_t)_j$ に対して付1.3表(S_{mt_B})に定める許容時間(h)

K_t : 4.3.3 ロ(ニ)に定めるところによる。

ニ. 運転状態IVにおいて生ずる応力は、次の値を超えないこと。

- (イ) 長期及び短期荷重による一次一般膜応力と長期及び短期二次膜応力との和は、考えている負荷状態における最高断面平均金属温度に対して、付1.4表(S_u)に定める値の3分の2倍の値

ただし、オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金にあっては、上記の値又は考えている負荷状態の最高断面平均金属温度に対して、付1.8表(S_m)に定める値の2.4倍の値のうち、いずれか小さい方の値

- (ロ) 長期荷重による一次一般膜応力と長期二次膜応力との和は、考えている負荷状態における最高断面平均金属温度及びその状態の持続時間に対して付1.5表(S_R)に定める値の3分の2倍の値

(ハ) 長期及び短期荷重による一次一般膜応力、長期及び短期荷重による一次曲げ応力、長期及び短期二次応力の和は、(イ)に定める値の1.5倍の値

(ニ) 長期荷重による一次一般膜応力及び一次曲げ応力と長期二次応力の和は、(ロ)に定める値に係数Ktを乗じた値。ただし、Ktは、 $2Smt_B$ を付1.6表のStに読み替えるものとする。

ホ. 運転状態 I、II、III及び運転状態IVにわたって次の制限を満足すること。

(イ) 長期荷重による一次一般膜応力と長期二次膜応力との和の1.5倍の値に対する使用分数和はB_R値(1.0とする)を超えないこと。

$$\sum_i \frac{t_i}{t_{R,i}} \leq B_R$$

ここで、

t_i : 4.3.3 ハ(イ)に定めるところによる。

$t_{R,i}$: 温度T_i、応力強さ $1.5(P_m+Q_m)_i$ に対して付1.5表(S_R)に定める許容時間(h)

(ロ) 長期荷重による一次一般膜応力、一次曲げ応力及び長期二次応力の和を係数Ktで除した値の1.5倍の値に対する使用分数和は1.0を超えないこと。

$$\sum_j \frac{t_j}{t_{R,bj}} \leq 1.0$$

ここで、

t_j : 4.3.3 ハ(ロ)に定めるところによる。

$t_{R,bj}$: 温度T_j、応力強さ $1.5((P_m+P_b+Q)/Kt)_j$ に対して付1.5表(S_R)に定める許容時間(h)

Kt : 4.3.3 ロ(ニ)に定めるところによるが、 $2Smt_B$ を付1.6表のStに読み替えるものとする。

ヘ 「告示」の適用温度範囲を超える試験状態においては、本規定第4.3.3項ロ号、ハ号及びホ号に定める運転状態IIに関する制限を満足すること。

(ひずみの制限)

4.3.4

4.3.4.1 高温で使用される高温工学試験研究炉炉心支持構造物の拘束バンドの運転状態I、II、III及び試験状態において生ずるひずみは次の値を超えないこと。

イ. 拘束バンドの累積非弾性ひずみは、次の(イ)及び(ロ)の制限値を超えてはならない。この制限は、3つの主ひずみのうちの最大正値に対して適用する。

(イ) 断面平均ひずみ 0.01

(ロ) 断面内の等価線形ひずみ分布により定める表面ひずみ 0.02

ここにひずみの単位はmm/mmである。

ロ. 弹性解析により、次の制限を満足する場合は、4.3.4.1 イを満足するものとすることができる。

運転状態I、II、III及び試験状態のすべての負荷サイクルにおける $\langle Q+Q^* \rangle_R$ に関して次式を満足すること。

$$\langle P_m + P_{m*} + (P_b + P_{b*}) / K_t \rangle_{max} + \langle Q + Q* \rangle_R \leq S_a$$

ここに記号 $\langle \sigma \rangle$ は応力 σ に関する負荷サイクル中の応力強さ範囲を表わすものであり、下つき添字maxは添字を付した量の運転状態Ⅰ、Ⅱ及び試験状態を通しての最大値を表わす。

P_{m*} : 短期荷重による一次一般膜応力

P_b : 長期荷重による一次曲げ応力

P_{b*} : 短期荷重による一次曲げ応力

Q : 長期2次応力

$Q*$: 短期2次応力

K_t : 4.3.3 ロ(ニ)に定めるところによる。

S_a は次の(イ)又は(ロ)に定める値のうちいずれか小さい方の値とする。

(イ) 運転状態Ⅰ、Ⅱ及び試験状態を通しての最高断面平均金属温度に対して時間を $10^4 h$ として付1.6表(S_t)に定める値の1.25倍の値。

(ロ) 評価の対象とする $\langle Q + Q* \rangle_R$ が属する負荷サイクルの最高断面平均金属温度及び最低断面平均金属温度のそれぞれに対して付1.7表(Sy)又は「告示」の別表第9に定める値の平均値。

ただし評価の対象とする $\langle Q + Q* \rangle_R$ を定める応力状態のうち少くともひとつの状態における断面平均金属温度が次に定める温度 T_0 より低い場合は、

(イ)の値にかかわらず(ロ)の値によって S_a の値を定めることができる。ここに温度 T_0 は、付1.8表(S_m)に定める値が時間を $10^5 h$ として付1.6表(S_t)に定める値に等しい温度である。

4.3.4.2 高温で使用される高温工学試験研究炉炉心支持構造物の拘束バンドの運転状態IVに関するひずみの制限については、「高温構造設計方針」3.4.3に定めるところによる。ただし、「壁厚」は「断面」に、PLは P_m に、PL*は P_{m*} に、別表1.2(別図1.2)は、付1.8表(S_m)にそれぞれ読み替えるものとする。

(クリープ疲労損傷の制限)

4.3.5 高温で使用される高温工学試験研究炉炉心支持構造物の拘束バンドの運転状態Ⅰ、Ⅱ及び試験状態において生ずるクリープ疲労損傷の制限は次のイ及びロ又はハに定めるところを満足することとする。

イ. 運転状態Ⅰ、Ⅱ及び試験状態にわたって、累積クリープ損傷係数(D_c)に関する次の制限を満足しなければならない。

$$D_c = 2 \int_0^{t*} \frac{dt}{t_R(S_i, T_i)} \leq 0.1 \quad (4.3.5-1)$$

ここで、

$t*$: 「告示」の別表第2の適用温度範囲を超える金属温度における使用時間の総和を下回らない時間(h)

S_i : 高温使用時間の各時刻において生ずる一次応力と二次応力を加えた応力強さ

T_i : 高温使用時間の各時刻において生ずる金属温度

$t_R(S_i, T_i)$: 温度(T_i)、応力強さ(S_i)に対して付1.5表(S_R)に定める許容時間(h)

ロ. 運転状態 I、II 及び試験状態にわたって、累積疲労損傷係数 (D_f) は0.1以下でなければならない。ただし、「告示」の適用温度範囲内のひずみサイクルにあっては、「告示」の該当条項に定めるところにより「疲れ累積係数」を算定し、これを D_f に加算するものとする。なお、「告示」の別図第1、第2(設計疲れ線図)は、それぞれ付1.1-(a)、-(b)図(設計疲れ線図)に読み替えることができる。

累積疲労損傷係数 (D_f) は付1.1-(a)、-(b)図(設計疲れ線図)を用いて「告示」の疲れ解析に準拠するものとするが、繰返しピーク応力強さは付1.7表(S_y)の値を超えてはならないものとする。

ハ. (4.3.5-1)式による累積クリープ損傷係数が $D_c > 0.1$ の場合は、クリープ疲労相互作用を適切に考慮して、クリープ疲労損傷の制限を満足すること。

(疲れ強度減少係数等)

4.3.6 疲れ解析に使用する疲れ強度減少係数及び応力集中係数は、理論的又は実験的に求めたものでなければならない。

(座屈の防止)

4.3.7 高温で使用される高温工学試験研究炉炉心支持構造物の拘束バンドの軸方向に圧縮荷重を受ける円筒形の胴にあっては、圧縮応力は、次の値を超えないこと。

イ. 運転状態 I、II 及び試験状態においては、次に掲げる値のいづれか小さい方の値

(イ) 付1.3-(b)表 (S_{mt_B}) に定める値の2倍の値

(ロ) 「告示」の別図第14により求めた値の100分の1の値

ロ. 運転状態IIIにおいては、イに定める値の1.5倍の値

ハ. 運転状態IVにおいては、イに定める値の2倍の値

5. あとがき

高温工学試験研究炉のボルト等及び拘束バンドは、使用材料に高温の強度特性が優れたSNB16, SUS316を選定するとともに、通常運転時には非クリープ温度域で使用され、異常過渡・事故時にのみ、僅かクリープ温度域に入る使用条件である。

本報告書では、これらの使用条件並びに使用する材料の特性を考慮しつつ、防止すべき破損モードを明かにして、基本的な構造健全性の確保の考え方及びそれに基づく構造の規格を示した。

本構造の規格は、高温工学試験研究炉のボルト等及び拘束バンドの基本的な構造健全性を確保する上で十分な保守性を有するが、将来のデータの蓄積により更に合理化・一般化する方向への努力は必要と考えている。

なお、高温、長時間下でボルト等及び拘束バンドの様な、締結または緊縛構造を使用すると、材料のクリープ特性による応力緩和で、締め付け力が低下する場合があるが、構造の規格で、この為の規定を設けないのは次の理由による。

高温、長時間下でシール性等の確保が必要な部位でボルト等を使用する場合、締め付け力の低下に対する対策としては、以下に示す様な幾つかの方法が考えられる。

- イ) 増し締めを行って、締め付け力の維持をはかる。
- ロ) 内圧等によって生じる応力を、緩和応力に比較し十分低い水準にする。
- ハ) バネ効果を有する構造にして、締め付け力の維持をはかる。

締め付け力の低下に対する対応策として、種々の方法があることと、どの程度まで締め付け力の低下を許容するかは使用目的によって異なることから、一義的に規定を定めることは困難であり、また、設計の融通性も損なうので合理的でない。

どのような方法を採用するかについては設計者が使用目的に応じて、接近性、内圧の水準、締め付け力の低下の程度（使用温度・時間）、使用するガスケットの種類（維持すべき締め付け力）等を考慮して、総合的判断に基づき適切な選択をすべき事項であると考える。

謝 辞

本構造の規格を策定するに当たっては、数多くの御援助を頂いた。材料特性について多々御教示頂いたパブコック日立（株）の工藤昭雄氏、清水義右氏、石川島播磨重工業（株）の北川正樹氏、金属材料技術研究所の田中千秋氏、原研の高温材料強度研究室の鈴木雅秀氏、深谷清氏に感謝いたします。構造解析・応力評価について御援助を頂いた富士電機（株）の三木俊也氏、辻延昌氏に感謝いたします。

また、規格策定の考え方、特に応力制限等の規定策定に貴重な御助言を頂いた動力炉・核燃料開発事業団の方々に深甚なる感謝の意を表します。

高温で使用されるボルト等及び拘束バンドの構造の規格の作成にあたっては、財団法人 原子力安全研究協会の「高温ガス炉安全基準調査専門委員会・高温構造設計分科会」において検討をお願いした。この分科会で御指導いただいた矢川元基東大教授をはじめ、委員の方々及び事務局の方々に深く感謝いたします。

最後に、本報告書を取り纏めるにあたり、御指導いただき有益な御助言を賜った高温工学部HENDEL開発試験室の宮本喜晟室長、高温工学試験研究炉開発部の斎藤伸三次長、原子炉開発室の田中利幸室長、塩沢周策室長代理をはじめ高温工学試験研究炉開発部の方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 通商産業省資源エネルギー庁・公益事業部原子力発電安全管理課 編, 「解説 原子力設備の技術基準」(株)電力新報社.
- 2) 日本原子力研究所・委託調査, 非公開資料, 1986年3月.
- 3) 日本原子力研究所・委託調査(1), 非公開資料, 1987年3月.
- 4) 日本原子力研究所・委託調査(2), 非公開資料, 1987年3月.
- 5) 日本原子力研究所・委託調査, 非公開資料, 1988年4月.
- 6) 日本原子力研究所・委託調査, 非公開資料, 1989年4月.
- 7) 日本工業規格 JIS B 8243-1981 「圧力容器の構造」(財)日本規格協会.
- 8) 米国機械学会, "The ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III Division 1" Edition 1983.
- 9) 米国機械学会, "The ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III Code Case N-47" Edition 1983.
- 10) 米国機械学会, "The ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III Code Case N-253-4" Edition 1983.
- 11) 動力炉・核燃料開発事業団, 「高速原型炉第1種機器の高温構造設計方針」PNC N 241 84-08(1), 昭和59年9月.
- 12) 原子力安全研究協会, 非公開資料, 1985年9月.
- 13) 原子力安全研究協会, 非公開資料, 1987年2月.
- 14) 深谷, 鈴木 (原研), 私信 (非公開資料).
- 15) JEAC 4201-1986 「原子炉構造材の監視試験方法」(社)日本電気協会.
- 16) 深谷, 鈴木 (原研), 私信 (非公開資料).
- 17) 例え、K.Goldmann, "Environmental Design Factors for Sodium-Cooled Fast Reactors Components," IAEA-SM-130/62.
- 18) 例え、中尾嘉邦, "耐熱鋼・耐熱合金の進歩"「溶接学会誌」第51巻(1982)第5号.
- 19) 深谷, 鈴木 (原研), 私信 (非公開資料).
- 20) 通商産業省資源エネルギー庁・公益事業部原子力発電安全管理課 監修, 「発電用原子力設備に関する構造等の技術基準 質疑応答集」(社)火力原子力発電技術協会.
- 21) 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高温構造設計方針」JAERI-M 89-005, 1989年2月.
- 22) 八木晃一, 他3名, "複合荷重下の1Cr-Mo-V鋼のクリープ疲労相互作用"「材料」35-391, 1986.

付 錄

材料強度基準等

付1.1表	最大許容応力強さ	S_{o_B}
付1.2表	設計応力強さ	S_m_B
付1.3-(a)表	SNB16の設計応力強さ	$S_{m t_B}$
付1.3-(b)表	SUS316の設計応力強さ	$S_{m t_B}$
付1.4表	設計引張強さ	S_u
付1.5-(a)表	SNB16のクリープ破断応力強さ	S_R
付1.5-(b)表	SUS316のクリープ破断応力強さ	S_R
付1.6-(a)表	SNB16の設計応力強さ	S_t
付1.6-(b)表	SUS316の設計応力強さ	S_t
付1.7表	設計降伏点	S_y
付1.8表	設計応力強さ	S_m
付1.9表	綫弾性係数	E
付1.1-(a)図	設計疲れ線図 (SNB16)	
付1.1-(b)図	設計疲れ線図 (SUS316)	

付1.1表 最大許容応力強さ (S_{ab})

温度 °C	-30~40	75	100	150	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450
S N B 16	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0	13.3
S U S 316	7.0	6.4	6.0	5.5	5.1	4.9	4.7	4.6	4.5	4.4	4.3	4.2	4.1	4.0	

付1.2表 設計応力強さ (S_{mb})

温度 °C	-30~40	75	100	150	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450
S N B 16	20.0	19.5	19.3	18.9	18.5	18.3	18.1	17.9	17.7	17.4	17.1	16.7	16.2	15.8	15.1
S U S 316	7.0	6.4	6.0	5.5	5.1	4.9	4.8	4.6	4.5	4.4	4.3	4.2	4.1	4.0	

付1.3-(a)表 SNB 16の設計応力強さ (S_{mtb})

時間 h	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5		
4 2 5	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.8	15.5	14.6	13.7	
4 5 0	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	15.1	14.2	13.2	12.2	11.0

付1.3-(b)表 SUS 316の設計応力強さ (S_{mtb})

時間 h	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
4 2 5	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1	4.1
4 5 0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0

付1.4表 設計引張強さ (S_u)

温度 °C		設計引張強さ (S _u)										(kg/mm ²)								
		~40	75	100	150	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550
S N B	16	70.0	63.6	61.6	61.6	61.6	61.6	61.6	61.6	61.6	61.6	61.6	61.6	60.3	56.1	55.2	52.8	50.4	47.4	44.5
S U S	316	53.0	49.9	48.5	45.1	44.9	44.5	44.1	43.8	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.0	42.1	40.9

付1.7表 設計降伏点 (S_y)

温度 °C		設計降伏点 (S _y)										(kg/mm ²)								
		~40	75	100	150	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550
S N B	16	60.0	58.6	57.9	56.7	55.6	55.0	54.4	53.8	53.1	52.3	51.1	50.0	48.7	47.3	45.2	44.0	42.7	41.0	39.4
S U S	316	21.0	19.1	17.9	16.4	15.2	14.7	14.2	13.8	13.4	13.1	12.9	12.7	12.5	12.4	12.1	11.9	11.8	11.6	11.4

付1.8表 設計応力強さ (S_m)

温度 °C		設計応力強さ (S _m)										(kg/mm ²)								
		~40	75	100	150	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500	525	550
S N B	16	23.3	21.1	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5
S U S	316	14.0	14.0	14.0	14.0	13.5	13.5	13.2	12.8	12.4	12.1	11.9	11.6	11.4	11.2	11.1	10.9	10.7	10.6	10.4

付1.9表 繊弹性係数 (E)

温度 °C		繊弹性係数 (E)										(kg/mm ²)	
		375	400	425	450	475	500	525	550				
S N B	16	18600	18500	18400	18300	18000	17800	17500	17200				
S U S	316	17400	17200	17000	16700	16400	16200	15900	15700				

付1.5-(a)表 SNB 16のクリープ破断応力強さ (S_R)(kg/mm²)

時間 h 温度°C	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
425	56.1	56.1	56.1	56.1	56.1	54.5	52.0	49.4	46.6	43.8	41.1
450	55.2	55.2	55.2	53.9	51.3	48.4	45.8	42.6	39.7	36.5	33.1
475	52.8	52.8	51.0	47.9	45.0	42.0	39.0	35.3	31.9	28.0	23.6
500	50.4	48.0	45.0	41.5	38.5	35.0	31.0	26.5	22.2	16.3	11.9
525	47.4	41.7	38.5	34.5	30.8	26.2	21.4	15.5	—	—	—
550	42.0	35.0	31.1	26.5	21.4	15.2	10.9	—	—	—	—

付1.5-(b)表 SUS 316のクリープ破断応力強さ (S_R)(kg/mm²)

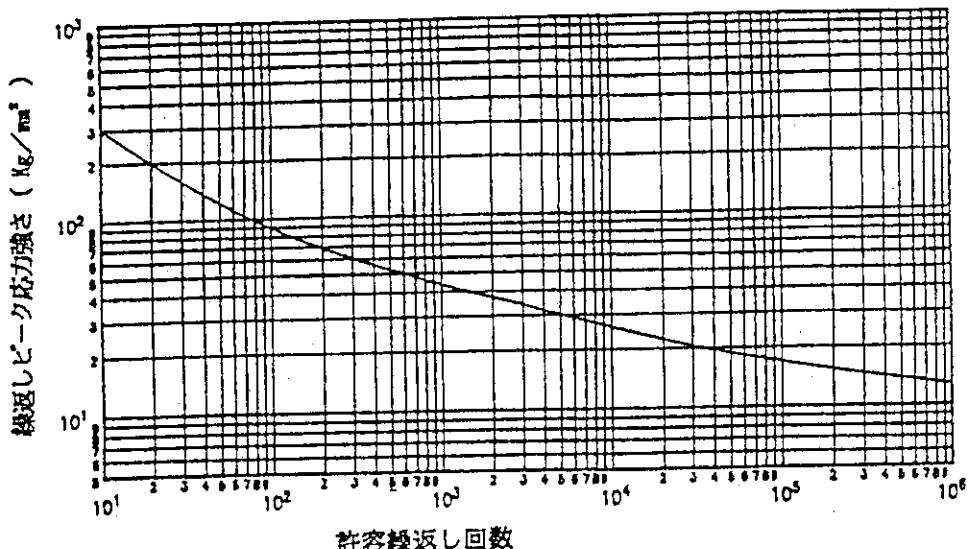
時間 h 温度°C	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
425	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	42.4	38.0	34.3
450	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	39.6	35.7	31.7	28.4
475	43.5	43.5	43.5	43.5	43.5	41.9	37.7	33.4	29.8	26.3	23.3
500	43.0	43.0	43.0	43.0	40.3	35.7	31.8	27.9	24.7	21.5	18.9
525	42.1	42.1	42.1	38.7	34.4	30.2	26.7	23.2	20.3	17.4	15.1
550	40.9	40.9	37.7	33.1	29.2	25.3	22.2	19.0	16.4	13.9	11.8

付1.6-(a)表 SNB 16の設計応力強さ (S_t)(kg/mm²)

時間 h 温度°C	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
425	37.4	37.4	37.4	37.4	37.4	36.5	34.6	32.8	31.0	29.2	27.5
450	36.8	36.8	36.8	35.8	34.2	32.2	30.5	28.4	26.5	24.4	22.1
475	35.2	35.2	34.0	32.0	30.2	28.0	26.0	23.6	21.5	18.5	15.6
500	33.6	31.9	29.9	27.6	25.6	23.1	20.6	17.8	14.8	10.9	7.9
525	31.6	27.7	25.6	23.0	20.5	17.5	14.0	10.1	—	—	—
550	28.0	23.2	20.7	17.5	14.4	10.2	7.2	—	—	—	—

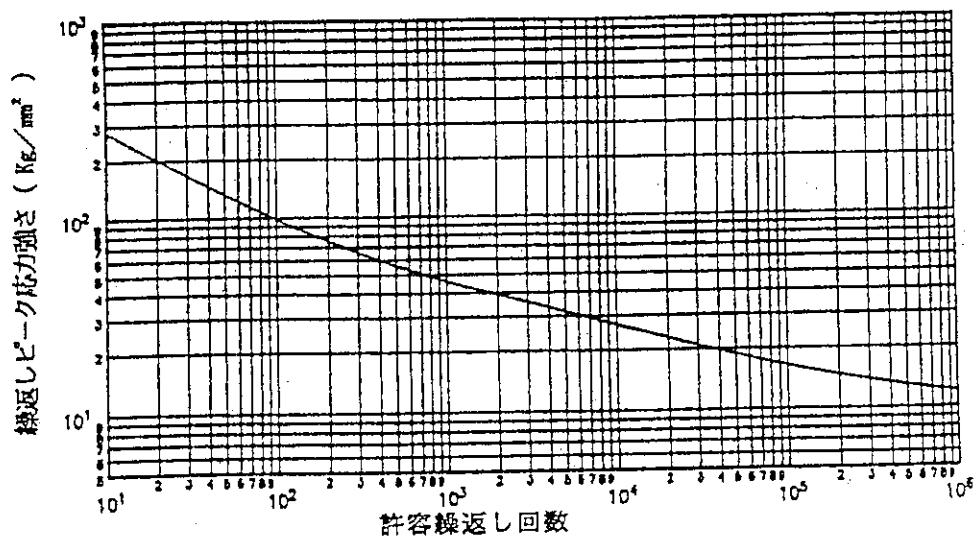
付1.6-(b)表 SUS 316の設計応力強さ (S_t)(kg/mm²)

時間 h 温度°C	1	10	30	10^2	3×10^2	10^3	3×10^3	10^4	3×10^4	10^5	3×10^5
425	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2
450	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9
475	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.6	14.6	14.6	14.5
500	14.6	14.6	14.5	14.5	14.5	14.5	14.5	14.4	14.3	14.2	12.6
525	14.3	14.3	14.3	14.3	14.2	14.2	14.1	13.9	13.5	11.6	10.0
550	14.1	14.1	14.0	13.9	13.8	13.6	13.3	12.7	11.0	9.3	7.9



- 備考 1) この図における繰返しピーク応力強さは、疲れ解析による繰返しピーク応力強さに
 1.86×10^4
 (使用温度における綾弾性係数) を乗じて得た値とする。
- 備考 2) 当該部に平均応力が作用する場合には、修正Goodman線図法により、設計疲れ線図を
 修正して用いること。
- 備考 3) 温度が450°Cを超える場合は、この図を使用できない。

付1.1-(a)図 設計疲れ線図 (SNB16)



- 備考 1) この図における繰返しピーク応力強さは、疲れ解析による繰返しピーク応力強さに
 1.70×10^4
 (使用温度における綾弾性係数) を乗じて得た値とする。
- 備考 2) 当該部に平均応力が作用する場合には、修正Goodman線図法により、設計疲れ線図を
 修正して用いること。
- 備考 3) 温度が450°Cを超える場合は、この図を使用できない。

付1.1-(b)図 設計疲れ線図 (SUS316)